

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**“EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LOS  
SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA  
LOCALIDAD DEL DISTRITO DE TARACO, PROVINCIA DE  
HUANCANÉ – PUNO.”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**ELWER VILCA ENRÍQUEZ**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PUNO – PERÚ**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**

**“EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LOS SISTEMAS  
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA LOCALIDAD DEL  
DISTRITO DE TARACO, PROVINCIA DE HUANCANÉ – PUNO”**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**ELWER VILCA ENRIQUEZ**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**



**APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:**

**PRESIDENTE**

**:**

**M.C. Emilio, CASTILLO ARONI**

**PRIMER MIEMBRO**

**:**

**Ing. Walter Hugo, LIPA CONDORI**

**SEGUNDO MIEMBRO:**

**Ing. Samuel, LAURA HUANCA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**Ing. Guillermo Néstor, FERNANDEZ SILA**

**TEMA:** Tratamiento de aguas residuales

**ÁREA:** Hidráulica y medio ambiente

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Hidráulica y medio ambiente.

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 20 DE DICIEMBRE DEL 2017

*“Leer un libro enseña más que hablar con su autor, porque el autor, en el libro, sólo ha puesto sus mejores pensamientos”.*

*René Descartes*

*“Siempre el inicio de toda tarea se torna dificultosa, pero luego de comenzado ella, el camino no parece tan tortuoso”.*

*Antonio Guevara Vera*

## DEDICATORIA

*Dedico al esfuerzo de mis padres, Gerónimo Vilca Apaza y Matilde Enríquez Tapia, ya que  
sin el apoyo incondicional de ellos no habría sido factible el logro  
de uno de mis objetivos profesionales, los quiero mucho.*

*A mis compañeros, amigos que me apoyaron*

*durante el desarrollo de*

*la Tesis.*

**ELWER VILCA ENRIQUEZ**

### AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional del Altiplano – Puno.
  
- A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil por brindarme sus conocimientos, recomendaciones a lo largo de mi formación profesional.
  
- Al Ing. Guillermo Néstor Fernández Sila, por su asistencia hacia mi persona durante la elaboración, revisión y finalización de este proyecto.
  
- A mis compañeros y amigos de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, que me fortalecieron con su apoyo durante el desarrollo de la investigación.
  
- Agradezco a Sr. Félix, personal encargado de la operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de la Municipalidad Distrital de Taraco por su apoyo en campo durante la recolección de datos.

**ÍNDICE GENERAL**

ÍNDICE DE TABLAS.....	13
RESUMEN .....	18
ABSTRACT .....	20

**CAPÍTULO I****INTRODUCCIÓN**

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	22
1.1.1 Problema general .....	23
1.1.2 Problemas específicos.....	23
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	23
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	25
1.3.1 Objetivo General.....	25
1.3.2 Objetivos específicos .....	25

**CAPÍTULO II****REVISIÓN DE LITERATURA**

2.1 ANTECEDENTES .....	26
2.2 LEGISLACIÓN PERUANA RELACIONADA A LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS .....	29
2.3 MARCO TEÓRICO .....	32
2.3.1 Agua residual .....	32
2.3.2 Composición de los caudales de aguas residuales .....	33
2.3.3 Composición de las aguas residuales.....	34
2.3.4 Tipos de agua residual. ....	37
2.3.5 Efectos de contaminación por las aguas residuales .....	38
2.3.6 Características de las aguas residuales.....	39
2.3.7 Niveles y procesos de tratamiento de aguas residuales .....	46
2.3.8 Tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de estabilización. ....	50

2.3.9	Clasificación de las lagunas .....	51
2.3.10	Ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización .....	60
2.3.11	Remoción de patógenos y parámetros convencionales.....	61
2.3.12	Criterios de diseño y construcción de lagunas de estabilización .....	64
2.3.13	Problemas operativos y su solución.....	65
2.3.14	Proceso de evaluación en lagunas de estabilización .....	68
2.3.15	Determinación de la eficiencia del sistema de tratamiento.....	69
2.3.16	Muestreo y medición de caudal .....	70
2.3.17	Tecnologías de tratamiento de aguas residuales domesticas para poblaciones pequeñas.....	74
2.3.18	Métodos de aplicación en el terreno .....	76
2.3.19	Métodos acuáticos.....	80
2.3.20	Diseño de humedales .....	98
2.3.21	Construcción de humedales .....	101
2.3.22	Criterios de selección de los sistemas de tratamientos naturales .....	102

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	ASPECTOS GENERALES .....	109
3.1.1	Ubicación del área de estudio .....	109
3.1.2	Accesibilidad a la localidad del distrito de Taraco.....	111
3.1.3	Características generales del ámbito de estudio .....	111
3.1.4	Descripción del sistema de tratamiento de aguas residuales de la localidad del distrito de Taraco .....	121
3.2	MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS EN GABINETE Y CAMPO .	125
3.3	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....	127
3.3.1	Naturaleza del estudio.....	127
3.3.2	Metodología para la medición de caudales y temperatura.....	127
3.3.3	Metodología para el muestreo de aguas residuales.....	129

3.3.4	Metodología para la caracterización físico química y microbiológica de las aguas residuales .....	131
3.3.5	Metodología para la propuesta de mejoramiento .....	132
3.3.6	Metodología para la propuesta de mejoramiento - selección de la tecnología	133

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSION

4.1	IDENTIFICACIÓN .....	135
4.2	UBICACIÓN, CONDICIONES FÍSICAS Y CLIMATOLÓGICAS, DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO .....	135
4.3	DIAGNÓSTICO .....	136
4.3.1	Situación actual.....	136
4.3.2	Registro histórico y evaluación de datos en campo.....	140
4.3.3	Muestreo de aguas residuales en lagunas de estabilización.....	142
4.3.4	Procesamiento y análisis de parámetros analizados.....	145
4.3.5	Calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua residual.....	155
4.4	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	174
4.4.1	Verificación del cumplimiento de los parámetros con respecto a la norma – Límites Máximos Permisibles.....	174
4.4.2	Eficiencia del sistema de tratamiento .....	176
4.4.3	Relación entre DBO y DQO, medida de la biodegradabilidad.....	177
4.4.4	Identificación de la causa del problema.....	178
4.4.5	Definición de la alternativa de solución.....	178
4.5	PROPUESTA DEL TREN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	179
4.5.1	Tratamiento preliminar .....	179
4.5.2	Tratamiento primario .....	180
4.5.3	Tratamiento secundario.....	182
4.6	LA TOTORA PLANTA FITODEPURADURA.....	192

4.6.1	Características generales de la totora.....	193
4.7	ECUACIONES Y PARÁMETROS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES COMO PROPUESTA DE MEJORAMIENTO.....	198
4.7.1	Periodo de diseño.....	198
4.7.2	Población de diseño .....	198
4.7.3	Caudales de diseño.....	201
4.7.4	Diseño de canal de entrada .....	205
4.7.5	Diseño de rejas de limpieza manual.....	206
4.7.6	Diseño del desarenador de flujo horizontal .....	212
4.7.7	Canaleta parshall.....	223
4.7.8	Diseño de tanque imhoff.....	230
4.7.9	Lechos de secados de lodos .....	234
4.7.10	Diseño de humedal de flujo subsuperficial.....	237
4.7.11	Evaluación de remoción de Coliformes Fecales en humedales artificiales	245
4.7.12	Consideraciones en el diseño de los humedales .....	245
4.8	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA PROPUESTA DE PLANTEAMIENTO.....	249
4.8.1	Unidades de pre-tratamiento.....	249
4.8.2	Tratamiento primario .....	251
4.8.3	Tratamiento Secundario.....	260

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	CONCLUSIONES .....	264
5.2	RECOMENDACIONES.....	267
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	268
	ANEXOS.....	272

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Composición del Agua Residual Doméstica.....	35
Figura 2: Clasificación de las partículas sólidas contenidas en un agua residual, según su diámetro. ....	41
Figura 3: Flujograma de tecnologías empleadas en el tratamiento de Aguas Residuales. ....	49
Figura 4. Oxidación biológica aerobia.....	53
Figura 5. Relación simbiótica algas-bacterias .....	53
Figura 6. Descomposición anaerobia del agua residual.....	54
Figura 7. Diagrama de una laguna anaerobia.....	55
Figura 8: Proceso aerobio y proceso anaerobio .....	56
Figura 9: La interacción de bacterias y algas en las zonas aeróbicas y anaeróbicas en una laguna facultativa de estabilización. ....	57
Figura 10: Un diagrama de una laguna facultativa .....	58
Figura 11: Lagunas de estabilización conectadas en paralelo .....	59
Figura 12: Lagunas de estabilización conectadas en serie.....	59
Figura 13. Esquema de trayectoria hidráulica de aplicación para SR .....	77
Figura 14. Esquema de trayectoria hidráulica de aplicación para IR .....	78
Figura 15. Esquema del sistema de escorrentía superficial .....	80
Figura 16. Humedal artificial de flujo libre superficial .....	82
Figura 17. Esquema de un humedal subsuperficial de flujo vertical .....	84
Figura 18. Esquema de un humedal artificial de flujo horizontal.....	84
Figura 19. Diagrama del metabolismo del nitrógeno .....	92
Figura 20. Localización de la zona de intervención .....	110
Figura 21. Variación de la precipitación con respecto al tiempo.....	112
Figura 22. Variación de temperatura con respecto al tiempo .....	113
Figura 23. Climograma de la localidad del distrito de Taraco.....	114
Figura 24. Variación de la velocidad del viento con respecto al tiempo en la localidad de Taraco .....	115
Figura 25. Variación de la evapotranspiración a lo largo del año – Taraco .....	116
Figura 26. Balance hídrico de la localidad de Taraco.....	118
Figura 27. Sistema de tratamiento N° 01 – Distrito de Taraco.....	122
Figura 28. Sistema de tratamiento N° 02 – Distrito de Taraco.....	124

Figura 29. Localización de los sistemas de tratamiento – Distrito de Taraco .....	124
Figura 30. Medición de caudal y temperatura en campo .....	128
Figura 31. Caracterización físico-químico de aguas residuales – Laboratorio de Facultad de Ingeniería Química UNA Puno .....	131
Figura 32. Caracterización microbiológica de aguas residuales – Laboratorio de Facultad de Ciencias Biológicas UNA Puno .....	131
Figura 33: Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales N° 02 - Puntos de muestreo.....	143
Figura 34: Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales N° 01- Puntos de muestreo.....	143
Figura 35. Dimensiones de una laguna de estabilización .....	145
Figura 36. Variación de caudal promedio horario en el Sistema de tratamiento N° 01	152
Figura 37. Variación de caudal promedio horario - Sistema de tratamiento N° 02.....	153
Figura 38. Variación de caudal promedio en el sistema de tratamiento N° 01.....	154
Figura 39. Variación de caudal promedio en el sistema de tratamiento N° 02.....	155
Figura 40. Variación de pH en el sistema de tratamiento N° 01 .....	157
Figura 41. Variación de pH en el sistema de tratamiento N° 02 .....	157
Figura 42. Variación de SST en el sistema de tratamiento N° 01 .....	158
Figura 43. Variación de SST en el sistema de tratamiento N° 02 .....	159
Figura 44. Variación de DBO <sub>5</sub> en el sistema de tratamiento N° 01.....	160
Figura 45. Variación de DBO <sub>5</sub> en el sistema de tratamiento N° 02.....	160
Figura 46. Variación de DQO en el sistema de tratamiento N° 01.....	161
Figura 47. Variación de DQO en el sistema de tratamiento N° 02.....	162
Figura 48. Variación de grasas y aceites en el sistema de tratamiento N° 01 .....	163
Figura 49. Variación de grasas y aceites en el sistema de tratamiento N° 02 .....	164
Figura 50. Variación de fósforo total en el sistema de tratamiento N° 01.....	165
Figura 51. Variación de fósforo total en el sistema de tratamiento N° 02.....	166
Figura 52. Variación de nitrógeno amoniacal en el sistema de tratamiento N° 01.....	167
Figura 53. Variación de nitrógeno amoniacal en el sistema de tratamiento N° 02.....	168
Figura 56. Variación de nitratos en el sistema de tratamiento N° 01 .....	169
Figura 57. Variación de nitratos en el sistema de tratamiento N° 02 .....	169
Figura 58: Corte transversal de una planta de lecho de secado. ....	182
Figura 59. Plantas heliófitas en medio acuático – totora .....	193
Figura 60. Totora existente en la laguna MECCARAQUE – Taraco.....	193

Figura 61. Raíces y brotes de la totora.....	195
Figura 62. Tallo de totora. ....	195
Figura 63. Corte longitudinal del xilema y el floema en la totora. ....	196
Figura 64. Inflorescencia de la totora .....	197
Figura 65. Rejas de limpieza manual.....	209
Figura 66. Inclinación de rejas de limpieza manual .....	210
Figura 67. Esquema de un desarenador de flujo horizontal.....	213
Figura 68. Desarenador de dos unidades en paralelo (vista en planta) .....	214
Figura 69. Sedimentación de una partícula.....	217
Figura 70. Modelo de sedimentación de una partícula de arena.....	219
Figura 71. Esquema de un desarenador .....	222
Figura 72. Esquema de medidor Parshall. ....	224
Figura 73. Tanque Imhoff.....	230
Figura 74. Vista del lecho de secado .....	236
Figura 75: Curvas granulométricas de materiales usados para la conformación del lecho filtrante.....	247

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de PTAR. ....	31
Tabla 2: Composición de excrementos y orina humanos .....	34
Tabla 3: Composición típica del agua residual domestica bruta .....	36
Tabla 4: Tipos de agua residual .....	37
Tabla 5: Efectos indeseables de las aguas residuales .....	38
Tabla 6: Tipos de agua residual según la relación de biodegradabilidad .....	42
Tabla 7: Niveles y procesos de tratamiento de aguas residuales .....	47
Tabla 8: Rendimientos (%) en las etapas de depuración de las aguas residuales .....	48
Tabla 9: Ventajas y limitaciones de los procesos aerobio y anaerobio.....	56
Tabla 10: Eficiencia de remoción de patógenos y parámetros convencionales.....	62
Tabla 11: Clasificación de riesgos de patógenos .....	63
Tabla 12: Señales del mal funcionamiento de una laguna.....	67
Tabla 13: Sitio y tipo de muestreo .....	71
Tabla 14: Características generales de las lagunas y frecuencia de muestreo .....	72
Tabla 15: Parámetros operacionales y frecuencia de muestreo .....	73
Tabla 16: Parámetros de monitoreo y frecuencia de muestreo .....	73
Tabla 17: Mecanismos de remoción de los contaminantes en los humedales .....	85
Tabla 18: Criterios de selección de sistemas de tratamiento naturales.....	103
Tabla 19: Matriz de selección final de sistemas de tratamiento naturales.....	104
Tabla 20: Vías de acceso a la localidad del distrito de Taraco .....	111
Tabla 21: Precipitación media mensual en la localidad de Taraco.....	112
Tabla 22: Temperaturas medias mensuales en la localidad de Taraco .....	113
Tabla 23: Velocidad media mensual del viento en la localidad de Taraco.....	114
Tabla 24: Cálculo de evapotranspiración mensual en la localidad de Taraco. ....	116
Tabla 25: Cálculo del balance hídrico del suelo en la localidad de Taraco.....	117
Tabla 26: Población total, por grandes grupos de edad - Taraco.....	119
Tabla 27: Ubicación geográfica y coordenadas del sistema de tratamiento N° 01.....	122
Tabla 28: Ubicación geográfica y coordenadas del sistema de tratamiento N° 02.....	123
Tabla 29: Fechas de medición de caudales de las aguas residuales.....	128
Tabla 30: Características generales de los sistemas de tratamientos .....	140
Tabla 31: Características físicas de las lagunas de estabilización .....	146
Tabla 32: Extensión superficial, periodo de retención y factor de forma.....	146

Tabla 33: Medición de caudal y temperatura en el sistema de tratamiento de agua residuales N° 01 - Afluente.....	148
Tabla 34: Medición de caudal y temperatura en el sistema de tratamiento de agua residuales N° 01 – Efluente .....	149
Tabla 35: Medición de caudal y temperatura en el sistema de tratamiento de agua residuales N° 02 – Afluente .....	150
Tabla 36: Medición de caudal y temperatura en el sistema de tratamiento de agua residuales N° 02 – Efluente .....	151
Tabla 37: Resultados de laboratorio, análisis de parámetros físico, químicos y microbiológicos de aguas residuales.....	171
Tabla 38: Eficiencia de remoción de los sistemas de tratamiento de aguas residuales - Taraco .....	172
Tabla 39: Resumen de la caracterización de aguas residuales en ambos sistemas .....	173
Tabla 40: Comparación del efluente con los LMPs - Sistema de tratamiento N° 01 ...	174
Tabla 41: Comparación del efluente con los LMPs - Sistema de tratamiento N° 02 ...	175
Tabla 42: Remoción de DBO <sub>5</sub> , DQO- Sistema de tratamiento N° 01 .....	176
Tabla 43: Remoción de DBO <sub>5</sub> , DQO- Sistema de tratamiento N° 02 .....	177
Tabla 44: Matriz de selección final – toma de decisiones .....	183
Tabla 45: Comparación entre los HFL y HSS – Toma de decisiones .....	185
Tabla 46: Características de las especies vegetales más utilizadas en humedales artificiales.....	190
Tabla 47: Capacidad depuradora de humedales con totora ( <i>Scirpus spp.</i> ) .....	198
Tabla 48: Incremento Anual en %, Método de la OMS .....	201
Tabla 49: Dotación de agua de consumo de habilitaciones urbanas (L/hab.día).....	202
Tabla 50: Valores de infiltración en tuberías.....	204
Tabla 51: Parámetros de diseño para rejillas .....	207
Tabla 52: Espesores y espaciamientos de rejillas .....	207
Tabla 53: Clasificación y tamaño de barras .....	208
Tabla 54: Valores del coeficiente “a” .....	221
Tabla 55: Características de descarga de canales Parshall (Ackers, 1978).....	226
Tabla 56: Tamaño del Medidor .....	227
Tabla 57: Dimensiones de medidores Parshall. ....	229
Tabla 58: Relación de temperatura con respecto al factor de capacidad relativa .....	232
Tabla 59: Relación de temperatura con respecto al tiempo de digestión de lodos .....	233

Tabla 60: Conductividad térmica de los componentes de un HSS .....	238
Tabla 61: Eficiencia de sistema de humedales en la remoción de contaminantes.....	245
Tabla 62: Resumen de las actividades de operación y mantenimiento de las unidades de pre-tratamiento.....	251
Tabla 63: Actividades de operación y mantenimiento del sistema por HSS .....	261

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

UIT: Unidades Impositivas Tributarias

LMP: Límites Máximos Permisibles

ECA: Estándares de Calidad Ambiental

EPS: Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento

MVCS: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento

PTAR: Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

SUNASS: Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento

MINAM: Ministerio del Ambiente

CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

ARD: Agua residual doméstica

RNE: Reglamento Nacional de Edificaciones

FONAM: Fondo Nacional del Ambiente

TRH: Tiempo de retención hidráulica

ES: Escorrentía superficial

RI: Rapid infiltration

SR: Slow rate

CIC: Capacidad de intercambio catiónico

HFL: Humedales de flujo libre o superficial

HFS: Humedales de flujo subsuperficial

HAFV: Humedales artificiales de flujo vertical

HAFH: Humedales artificiales de flujo horizontal

MA: Media aritmética

INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática

OMA: Oficina de Medio Ambiente

SST: Sólidos suspendidos totales

NMP: Número más probable

OMS: Organización Mundial de la Salud

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación denominado “Evaluación y propuesta de mejoramiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de la localidad del distrito de Taraco, provincia de Huancané – Puno”, tiene como objetivo principal evaluar la calidad del agua residual tratada en los sistemas de tratamiento existentes en la localidad del distrito de Taraco en los aspectos de calidad de vertimiento al río Ramis y proponer estrategias y/o alternativas de solución para el buen funcionamiento, caracterizando los parámetros fisicoquímicas y microbiológicas establecidos en los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). El alcance de la investigación efectuado según su finalidad es de tipo aplicativo, el diseño de la investigación es no experimental, ya que no se manipularon ninguna de las variables deliberadamente es decir las variables independientes ya han ocurrido y no pueden ser manipuladas lo que impide influir sobre ellas para modificarlas como es el caso de los caudales a tratar, nivel de contaminación de los efluentes líquidos. El nivel de estudio es de tipo tecnológico.

Los parámetros físico químicos y microbiológicos evaluados mediante muestreos en los puntos llamados afluentes y efluentes de los sistemas de tratamiento existentes (laguna tipo facultativa), fueron la temperatura, potencial de hidrógeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), Demanda Química de Oxígeno (DQO), aceites y grasas, Sólidos Totales en Suspensión, Fosforo Total, Nitratos, Nitrito, Nitrógeno Amoniacal  $NH_4$ , Coliformes Totales, Coliformes Fecales, *Vibrio Cholerae*, *Salmonella SP*, Huevos de Helminetos. De los cuales los cuales los parámetros como la  $DBO_5$ , DQO, Sólidos Totales en Suspensión y coliformes termotolerantes, sobrepasan los valores considerados en los LMP, en consecuencia, el nivel de contaminación hacia el río es considerado alto, por lo que nos conlleva a plantear un nuevo sistema de

tratamiento de aguas residuales para la localidad del distrito de Taraco tomando en cuenta en el diseño el tratamiento preliminar (cribado, desarenador, canaleta Parshall), primario (tanque Imhoof, lecho de secado) y secundario (humedal Artificial de flujo subsuperficial), considerando como vegetación en el humedal la totora, vegetal que se ha adaptado muy bien en la zona. El sistema planteado es diseñado para cumplir con la normativa de los LMP y ECA.

**Palabras Clave:** evaluación, parámetros, afluente, efluente, agua residual, humedal.

## ABSTRACT

The present research work called "Evaluation and proposal of improvement of the wastewater treatment systems of the district of Taraco, province of Huancané - Puno", has as main objective to evaluate the quality of the treated wastewater in the systems of existing treatment in the locality of the district of Taraco in the quality aspects of dumping to the Ramis River and propose strategies and / or alternative solutions for the proper functioning, characterizing the physicochemical and microbiological parameters established in the Maximum Permissible Limits (LMP) and the Environmental Quality Standards (ECA). The scope of the research carried out according to its purpose is of an applicative type, the design of the research is non-experimental, since none of the variables were deliberately manipulated, that is, the independent variables have already occurred and can not be manipulated, which prevents influencing on them to modify them as is the case of the flows to be treated, level of contamination of the liquid effluents. The level of study is of a technological nature. The physical and microbiological parameters evaluated by sampling at the points called tributaries and effluents of the existing treatment systems (facultative type lagoon) were temperature, hydrogen potential (pH), Biochemical Oxygen Demand (BOD5), Chemical Demand Oxygen (COD), oils and fats, Total Suspension Solids, Total Phosphorus, Nitrates, Nitrite, Ammonia Nitrogen NH<sub>4</sub>, Total Coliforms, Fecal Coliforms, *Vibrio Cholerae*, *Salmonella* SP, Helminth Eggs. Of which which the parameters such as BOD5, COD, total suspended solids and thermotolerant coliforms, exceed the values considered in the PML, consequently, the level of contamination towards the river is considered high, which is why it leads us to raise a new wastewater treatment system for the district of Taraco, taking into account in the design the preliminary treatment (screening, sand trap, Parshall gutter), primary (Imhoof tank,

drying bed) and secondary (Artificial wetland of subsurface flow), considering as vegetation in the wetland the totora, a plant that has adapted very well in the area. The proposed system is designed to comply with the regulations of the LMP and ECA.

**Keywords:** evaluation, parameters, tributary, effluent, wastewater, wetland.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El cumplimiento de la calidad de tratamiento de las aguas residuales en las diferentes partes del nuestro país se está dejando de lado debido al descuido de las instituciones fiscalizadores y municipalidades, vertiéndose agua residual de alto grado de contaminación hacia los cuerpos receptores (ríos, lagos y lagunas). En la actualidad en nuestro país especialmente en zonas urbanas encontramos una serie de infraestructuras de sistemas de tratamiento de aguas residuales totalmente colapsadas, esto debido a diferentes razones como, por ejemplo: cumplieron con su ciclo de vida, incremento de población, mal diseño hidráulico, falta de mantenimiento, etc.

La situación actual de los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Sistema de tratamiento N° 01 y Sistema de tratamiento N° 02), en la localidad del Distrito de Taraco es preocupante debido a que en ellos se emplean lagunas de estabilización de tipo facultativas, las cuales están operando de una manera deficiente sin ningún tipo de pre-tratamiento, tratamiento primario, vertiéndose los efluentes hacia el río Ramis, con presencia de sólidos de excretas humanas. Cabe indicar que la captación de agua para el consumo humano del distrito de Taraco se encuentra entre los dos sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Por otro lado, el sistema de tratamiento N° 02, se encuentra ubicada muy cercano a las viviendas habitadas, por lo que ya no cumple con las distancias mínimas establecidas en el Reglamento Nacional de Edificaciones.

Las consecuencias del problema se manifiestan en las inadecuadas condiciones de salubridad de la población, ya que están propensos a sufrir enfermedades gastrointestinales e infecto-contagiosas, ocasionado por el deficiente e inapropiado tratamiento que se le está brindando a las aguas residuales en la localidad de Taraco.

### **1.1.1 Problema general**

- ¿Cuál es la calidad de agua residual tratada en los sistemas de tratamiento existentes en la localidad del distrito de Taraco para su vertimiento hacia el río, y que estrategias y/o alternativas de mejora se puede plantear para el buen funcionamiento?

### **1.1.2 Problemas específicos**

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas residuales en el afluente y efluente de los sistemas de tratamiento existentes en la localidad del distrito de Taraco?
- ¿Qué estrategias y/o alternativas de solución se puede plantear para el buen funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes de la localidad del distrito de Taraco?

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Los seres humanos utilizamos el agua en las diferentes actividades, ya sea en consumo, agropecuario, etc., de las cuales, una de las consecuencias es el agua residual contaminada, modificada que se deja de lado el tratamiento respectivo por parte de quien la usa y la modifica causando contaminación en los cuerpos receptores.

Haciendo un análisis del uso y abuso del agua dulce en su forma natural es justa y necesaria que toda agua servida o residual debe ser tratada, tanto para proteger la salud pública como para preservar el medio ambiente.

La problemática de la disposición final de las aguas residuales causa una gran preocupación, que se está dejándose pasar por el descuido de las instituciones fiscalizadoras y las municipalidades. Podemos citar la Resolución Directoral N°044-2017-ANA-AAA-TIT documento emitido por la Autoridad Nacional del Agua en el cual se especifica la imposición a la Municipalidad Distrital de Taraco una multa de CINCO PUNTO UNO (5.1) UNIDADES IMPOSITIVAS TRIBUTARIAS (UIT) vigentes a la fecha de cancelación por infracción a la ley de Recursos Hídricos (ley N°29338) tipificado en el artículo 120° inciso 9) realizar vertimientos sin autorización; en concordancia con lo dispuesto en el Decreto Supremo N° 001-2010-AG, Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos artículo 277° literal d) efectuar el vertimiento de aguas residuales en cuerpos de agua sin autorización de la Autoridad Nacional del Agua.

Por lo tanto la presente investigación se enfoca en evaluar las características físico químicas y microbiológicas de las aguas residuales en los afluentes y efluentes para poder verificar la eficiencia de los sistemas de tratamiento de la localidad del distrito de Taraco y por otro lado comparar los resultados de los parámetros de cada uno de los efluentes con los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). Además de verificar las condiciones físicas de todos los componentes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, resultados que sirven como base en planteamiento de alternativas de solución que puedan permitir que el vertimiento de aguas residuales esté dentro de los rangos de los LMP.

### 1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.3.1 Objetivo General

- Evaluar la calidad del agua residual tratada en los sistemas de tratamiento existentes en la localidad del distrito de Taraco en los aspectos de calidad de vertimiento al río y proponer estrategias y/o alternativas de solución para el buen funcionamiento.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas en los afluentes y efluentes de los sistemas de tratamiento existentes en la localidad del distrito de Taraco.
- Plantear estrategias y/o alternativas de solución en base a una teoría para el buen funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes en la localidad del distrito de Taraco y lograr que el efluente este en el rango de los límites máximos permisibles de vertimiento del agua residual al cauce del río.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES

Callata (2014) realizó un trabajo de investigación en el distrito Ajoyani, con la finalidad de determinar la situación actual del análisis físico químico y bacteriológico de las aguas residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR existente en el distrito de Ajoyani, analizando la información existente en el órgano ambiental sobre el desempeño, para posteriormente proponer estrategias y/o alternativas en base a una teoría para el buen funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales PTAR del distrito de Ajoyani y lograr que el efluente esté de acuerdo a los límites máximos permisibles de vertimiento del agua residual al cauce del río; en el cual pudo que la eficiencia de remoción del sistema de tratamiento era baja, obteniendo parámetros físico químicos y biológicos que superan los Límites Máximos Permisibles, contaminando y afectando de este modo a la vida acuática existente. El autor plantea una propuesta del sistema de tratamiento de aguas residuales del Distrito de Ajoyani, considerado las siguientes estructuras: separador de sólidos, desengrasador, medidor parshall, sedimentador, filtro vertical múltiple, reactor biológico, nave de macrófitas o jacintos de agua, filtro lento, digestor de lodos, losa compostaje. Esto fin de cumplir con el vertimiento de aguas residuales al rio establecidos en el D.S. N° 003 – 2010 – MINAM.

Por otro lado, Quispe (2013) elaboró una propuesta metodológica para la evaluación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domesticas mediante lagunas de estabilización, aplicando la metodología en la evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas de la ciudad de Azángaro, con el fin de

determinar la eficiencia operacional del sistema y la calidad del efluente de acuerdo a los límites máximos permisibles para efluentes de aguas residuales domesticas establecidos por el MINAM, obteniendo valores determinados en el efluente que al comparar con los LMP (límites máximos permisibles) establecidos en el D.S. N° 003 – 2010 – MINAM, se concluye que el nivel de contaminación es alto ya que los contaminantes potenciales ( $DBO_5$ , DQO) superan los LMP en más del doble, contaminando y afectando de este modo a la vida acuática existente en el rio Azángaro.

Dueñas (2015) afirma que las lagunas de estabilización son un buen sistema de tratamiento de aguas residuales para pequeñas localidades como Quiquijana, por su simplicidad, tratamiento completo de las aguas residuales y principalmente por la fácil remoción y disposición de lodos que se realiza en seco, sin entrar en contacto directo con el lodo húmedo. Menciona que la PTAR actual, cuenta con una laguna solamente, lo cual está en contraposición con la norma del RNE OS-090. que regula el diseño de este tipo de estructuras, que indica un número mínimo de dos unidades en paralelo para permitir la adecuada operación y mantenimiento, principalmente en la remoción de lodos y que el tiempo de retención hidráulico de la laguna actual es de 4.61 días, lo cual se encuentra muy por debajo de las recomendaciones técnicas de diseño que indican que deben ser 10 días como mínimo. Plantea una propuesta consistente en la construcción de dos lagunas facultativas seguida de una de maduración, permitirá lograr una mejor calidad del efluente, incluso superior a los parámetros establecidos en el DS 003-2010-MINAN, y pueden aprovecharse para otros fines como el riego de vegetales, en vista de que se removerá un 100% de huevos de helmintos, 3 a 4 ciclos logarítmicos de coliformes termotolerantes, y se lograra una concentración promedio de  $DBO_5 \leq 50$  mg/l. y solidos suspendidos  $SS \leq 75$  mg/l.

Martínez y Guzmán (2003), realizaron un trabajo de investigación para determinar: 1. La cantidad y calidad del afluente y efluente de las lagunas de estabilización de las zonas militares en estudio, 2. Determinar los factores que influyen en la calidad de los efluentes, tanto físicos como de operación y mantenimiento, 3. Determinar los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, tales como temperatura, potencial de hidrogeno, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos sedimentables y suspendidos, nitritos y nitratos, y el análisis bacteriológico por el método de tubos de fermentación; todo esto para la evaluación de cada una de las lagunas estudiadas. De acuerdo a los resultados, el sistema de lagunas de la base militar de Jutiapa, no remueve como se esperaba; tiene los siguientes porcentajes de remoción: demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) 48.68%, sólidos sedimentables (S.S.) 48.88% y remoción bacteriológica de 74.20%. Por lo que sostienen que lagunas en serie analizados en este estudio no realizan la remoción de bacterias adecuadamente, como lo establece la teoría, pues a mayor cantidad de unidades en un sistema, mayor remoción de coliformes se debe tener.

En base a los antecedentes se plantea la presente investigación con el objeto de evaluar las características físico químicas y microbiológicas en los afluentes y efluentes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de manera comparativa con los Límites Máximos Permisibles (LMP) en concordancia a la normativa nacional, con el propósito de plantear mejoramiento y /o alternativa de solución de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de la localidad de Taraco.

## 2.2 LEGISLACIÓN PERUANA RELACIONADA A LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

### 2.2.1 Normas peruanas generales

A continuación, se señalan algunas de las normas peruanas significativas en relación con la investigación.

- Ley General de Servicios de Saneamiento: Ley N° 26338 (24/07/1994).
- Decreto Supremo N° 09-95-Pres. Reglamento de la Ley General de Servicios de Saneamiento (28/08/1995).
- Ley N° 26338. Ley General de Servicios de Saneamiento (24/07/1998).  
Modificada por Ley N° (22/03/2006) y Ley N° 28870 (12/08/2006).
- Política de Estado N°19 – Desarrollo Sostenible y Gestión Ambiental (22/07/2002).
- Decreto Supremo N°28611. Ley General del Ambiente (15/10/2005).
- Decreto Supremo N°023-2005- VIVIENDA Texto Único Ordenado del Reglamento de la Ley General de Servicios de Saneamiento. Ley N° 26338 (01/12/2005) modificado por Decreto Supremo N° 010-2007-VIVIENDA (20/04/2007), Decreto Supremo N° 024-2007- VIVIENDA (24/07/2007), Decreto Supremo N° 002-2008- VIVIENDA (07/02/2008), Decreto Supremo N° 031-2008- VIVIENDA (30/11/2008) y Decreto Supremo N° 009-2009- VIVIENDA (24/04/2009).
- Decreto Legislativo N° 1055. Decreto Legislativo que modifica la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente (27/06/2008).
- Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM (23/05/2009). Política Nacional de Ambiente.
- Norma Peruana OS 090. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

### 2.2.2 Normas ambientales y sanitarias

- Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM. Aprueban los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua (31/07/2008).
- Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA (20/11/2009). “Aprueban los Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario”.
- Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM. Aprueban disposiciones para la implementación de los ECA para el agua (19/12/2009).
- Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM “Aprueban LMP para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales domésticas o municipales (16/03/2010)”.
- Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM “Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación”.
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM “Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias”.

### 2.2.3 Límite Máximo Permisible (LMP)

Es la medida de la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su determinación corresponde al Ministerio del Ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental. Los criterios para la determinación de la supervisión y sanción serán establecidos por dicho Ministerio.

**Tabla 1:**

**Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de PTAR.**

<i>PARÁMETRO</i>	<i>UNIDAD</i>	<b>LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS</b>
Aceites y Grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes.	NMP/100mL	10 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno.	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno.	mg/L	200
pH	unidad	6.5 - 8.5
Sólidos Totales en Suspensión.	mg/L	150
Temperatura.	°C	<35

**Fuente:** D.S N° 003-2010-MINAM

### 2.2.4 Estándares de Calidad Ambiental (ECA)

Es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpos receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos.

Las categorías de los Estándares de Calidad Ambiental para agua, se clasifican en cuatro categorías, las mismas se mencionan a continuación:

- ✓ **Categoría 1:** Poblacional y recreacional.
- ✓ **Categoría 2:** Extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales.
- ✓ **Categoría 3:** Riego de vegetales y bebida de animales.
- ✓ **Categoría 4:** Conservación del ambiente acuático.

Las tablas de los Estándares de Calidad Ambiental, pueden tener una mejor apreciación en los anexos del presente trabajo.

## 2.3 MARCO TEÓRICO

### 2.3.1 Agua residual

Metcalf y Eddy (1998), señalan que "... Desde el punto de vista de las fuentes de generación, podemos definir el agua residual, como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residenciales, como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que se le pueden agregar, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

Según CEPIS (2005) se denomina aguas servidas a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua. Se les llama también aguas residuales, aguas negras o aguas cloacales. Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domesticas e industriales.

Según Romero (2001) las aguas residuales son aguas procedentes de las viviendas; oficinas y edificios comerciales, ya usadas del abastecimiento de una población, formadas por aguas domesticas cargadas de heces, orina y otros

desperdicios; toda esta masa está más o menos diluida por el agua de lavado de servicios públicos y aguas pluviales que se vierten sobre un depósito de agua natural.

### 2.3.2 Composición de los caudales de aguas residuales

Según Metcalf y Eddy (1998), la composición de los caudales de aguas residuales de una comunidad depende del tipo del sistema de recogida que se emplee, y puede incluir los siguientes componentes:

1. **Agua residual domestica (o sanitaria).** Procedente de zonas residenciales o instalaciones comerciales, públicas y similares.
2. **Agua residual industrial.** Agua residual en la cual predominan vertidos industriales.
3. **Infiltración y aportaciones incontroladas (I/I).** agua que entra tanto de manera directa como indirecta en la red del alcantarillado. la infiltración hace referencia al agua que penetra en el sistema a través de juntas defectuosas, fracturas y grietas o paredes porosas. Las aportaciones incontroladas corresponden a aguas pluviales, drenes de cimentaciones, bajantes de edificios y tapas de pozos de registro.
4. **Aguas pluviales.** Agua resultante de la escorrentía superficial.

Según Romero (2001) indica que “también se acostumbra denominar *aguas negras* a las aguas residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en solidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Y *aguas grises* a las aguas provenientes de tinas, duchas, lavamanos y lavadoras, aportantes de DBO, solidos suspendidos, fosforo, grasas y coliformes fecales, esto es, aguas residuales domésticas, excluyendo las de los inodoros”.

Las aguas negras, como ya se mencionó, transportan básicamente excrementos humanos y orina (ver Tabla 2) y por ello contribuyen principalmente con materia orgánica (DBO), sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales.

**Tabla 2:**

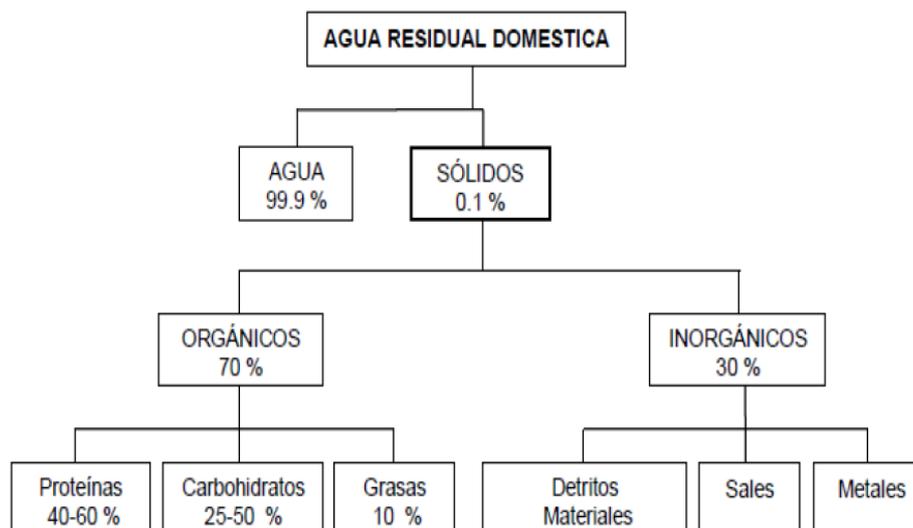
**Composición de excrementos y orina humanos**

Característica	Materia fecal	Orina
Cantidad (húmeda) por persona por día	135 - 270 g	1 - 1.3kg
Cantidad (seca) por persona por día	35 - 70g	50 - 70g
Humedad, %	66 - 80	93 - 96
Materia orgánica, %	88 - 97	65 - 85
Nitrógeno, %	5,0 - 7,0	15 - 19
Fósforo (como P <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	3,0 - 5,4	2,5 - 5,0
Potasio (como K <sub>2</sub> O), %	1,0 - 2,5	3,0 - 4,5
Carbono, %	44 - 55	11 - 17
Calcio (como CaO), %	4,5	4,5 - 6,0

**Fuente:** Romero (2001). Tratamiento de aguas residuales - Teorías y principios de diseño.

### 2.3.3 Composición de las aguas residuales

Según Metcalf y Eddy (1998), las aguas residuales consisten básicamente en: agua, sólidos disueltos y sólidos en suspensión. Los sólidos son la fracción más pequeña (representan menos del 0.1 % en peso del agua residual), pero representa el mayor problema a nivel del tratamiento. El agua provee sólo el volumen y el transporte de los sólidos disueltos y en suspensión.



**Figura 1:** Composición del Agua Residual Doméstica

Fuente: Metcalf y Eddy (1998)

Aproximadamente el 65% de los sólidos orgánicos son proteínas como albúminas, globulinas y enzimas provenientes de las industrias o de la actividad microbiológica en el agua residual. La proporción de los carbohidratos está en función de las costumbres en la región (éstos se encuentran en sus formas más comunes como glucosa, sacarosa, almidón y celulosa). Las grasas y aceites animales o vegetales son el tercer componente de los alimentos.

La composición de las aguas residuales se refiere a las cantidades de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas residuales.

La Tabla 3 presenta datos típicos de los constituyentes encontrados en el agua residual doméstica. En función de las concentraciones podemos clasificar el agua residual como concentrada, media o débil.

**Tabla 3:****Composición típica del agua residual domestica bruta**

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Solidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Disueltos, totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Solidos sedimentales	mg/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno, mg/l 5 días, 20 °C (DBO <sub>5</sub> , 20°C)	mg/l	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	mg/l	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1,000
Nitrógeno en forma de N	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoniacal libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fosforo (total en forma P)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	100
Sulfato	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como Ca CO <sub>3</sub> )	mg/l	50	100	150
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	n.º/100ml	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	µg/l	< 100	100- 400	> 400

**Fuente:** Metcalf y Eddy (1998)

### 2.3.4 Tipos de agua residual.

De acuerdo a Suarez (2011) existen diferentes formas de denominar a las aguas residuales, las cuales se detalla en la Tabla 4:

**Tabla 4:**

#### Tipos de agua residual

TIPO DE AGUA	DEFINICIÓN	CARACTERÍSTICA
Agua residual doméstica	Producida en las diferentes actividades al interior de las viviendas, colegios, etc.	Los contaminantes están presentes en moderadas concentraciones.
Agua residual municipal	Son las transportadas por el alcantarillado de una ciudad o población.	Contiene materia orgánica, nutrientes, patógenos, etc.
Agua residual industrial	Las resultantes de las descargas de industrias.	Su contenido depende del tipo de industria y/o procesos industriales.
Agua negra	Contiene orina y heces	Alto contenidos de nutrientes, patógenos, hormonas y residuos farmacéuticos.
Agua amarilla	Es la orina transportada con o sin agua.	Alto contenido de nutrientes, productos farmacéuticos, hormonas y alta concentración de sales.
Agua café	Agua con pequeña cantidad de heces y de orina.	Alto contenido de nutrientes, patógenos, hormonas y residuos.
Agua gris	Provenientes de lavamanos, duchas, lavadoras.	Tiene pocos nutrientes y agentes patógenos y por el contrario presentan máxima de carga de productos para el cuidado personal y detergentes.

**Fuente:** Suarez (2011).

### 2.3.5 Efectos de contaminación por las aguas residuales

Romero (2001) toda agua residual afecta en alguna manera la calidad del agua de la fuente o cuerpo de agua receptor. Sin embargo, se dice que un agua residual causa contaminación solamente cuando ella introduce características que hacen el agua de la fuente o cuerpo receptor inaceptable para el uso propuesto de la misma (ver Tabla 5).

**Tabla 5:**

#### Efectos indeseables de las aguas residuales

CONTAMINANTE		EFEECTO
Materia orgánica biodegradable		Desoxigenación del agua, muerte de peces, olores indeseables.
Materia suspendida		Deposición en los lechos de los ríos; si es orgánica se descompone y flota mediante el empuje de los gases; cubre el fondo e interfiere con la reproducción de los peces o transforma la cadena alimenticia.
Sustancias corrosivas, cianuros, metales, fenoles, etc		Extinción de peces y vida acuática, destrucción de bacterias, interrupción de la autpurificación.
Microorganismos patógenos		Las aguas residuales domesticas pueden transportar organismos patógenos, los residuos de curtiembre ántrax.
Sustancias que causan turbiedad, temperatura, color, olor, etc.		El incremento de la temperatura afecta a los peces; el color, olor y turbiedad hacen estéticamente inaceptable el agua para el uso público.
Sustancias o factores que transforman el equilibrio biológico		Pueden causar crecimiento excesivo de hongos o plantas acuáticas las cuales alteran el ecosistema acuática, causan olores, etc.
Constituyentes minerales		Incrementan la dureza, limitan los usos industriales sin tratamiento especial, incrementan el contenido de solidos disueltos a niveles perjudiciales para los peces o la vegetación, contribuyen a la eutrofización del agua.

**Fuente:** Metcalf y Eddy (1998).

### 2.3.6 Características de las aguas residuales

Señala Metcalf y Eddy (1998) el conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental de cara al proyecto y explotación de las infraestructuras tanto de recogida como de tratamiento y evacuación de las aguas residuales, así como para la gestión de la calidad medioambiental.

Crites y Tchobanoglous (2000) manifiestan que las características de las aguas residuales de un lugar varían dependiendo de factores como: consumo de agua potable, tipo y sistema de alcantarillado, presencia de desechos industriales, entre otros y es necesario considerar circunstancias tales como las variaciones diarias del caudal.

Las aguas residuales pueden provenir tanto de casas de habitación (aguas residuales domésticas), de empresas (aguas residuales de origen industrial o especiales) o de una mezcla de ambas (aguas mixtas). Todas ellas poseen características químicas y biológicas diferentes y por lo tanto la normativa establece parámetros especiales en cuanto a su caracterización.

Las aguas residuales domésticas, por lo general, no contienen sustancias peligrosas como lo son metales pesados, tóxicos fuertes, entre otros; pero sí una elevada cantidad de agentes infecciosos y patógenos, dado que su principal prominencia es de los servicios sanitarios. Son aguas con alta cantidad de amonio y nitrógeno debido a las excretas, lo que permite su tratamiento mediante diversos procesos biológicos.

#### a. Características físicas

Estas características de las aguas residuales son parámetros importantes para el tipo de tratamiento, así como para la gestión técnica de la calidad ambiental.

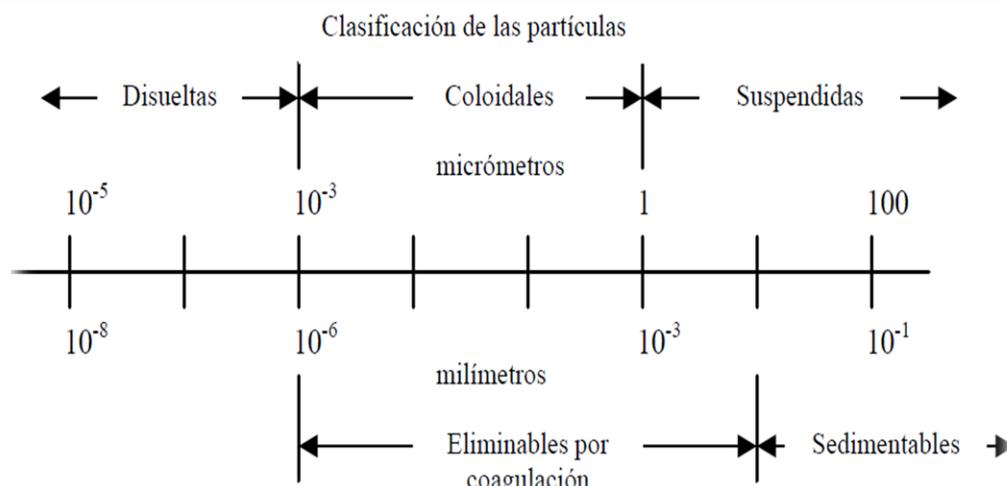
- **Temperatura:** Las ARD liberan energía, lo cual hace que tengan una temperatura más alta que las aguas no contaminadas, dependiendo también del lugar dónde se encuentre el PTAR. Es un parámetro bastante uniforme.

- **Color:** Al llegar el agua residual a la PTAR tiene un color gris y, conforme pasa el tiempo de retención, se torna negra, quiere decir que el agua residual se vuelve séptica. Pero puede tomar otros colores como verde (eutrofización) o rosácea (exceso de materia orgánica), indicando que las lagunas están trabajando mal y existe algún problema.
- **Olor:** 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 tolerante que el del agua residual séptica. La problemática de los olores está considerada como la principal causa de rechazo a la implantación de instalaciones de tratamiento de aguas residuales.
- **Sólidos:** Existen diferentes tipos de sólidos que se encuentran en las aguas negras.

**Los sólidos totales** se definen como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación entre 103 y 105° C. Los sólidos totales, o residuo de la evaporación, pueden clasificarse en **filtrables o no filtrables** (sólidos en suspensión). La **fracción filtrable** de los sólidos corresponde a **sólidos coloidales y disueltos**. La fracción coloidal consiste en partículas con un diámetro aproximado que oscila entre 0,001 y 1 micrómetro (figura 2). Esta fracción no puede eliminarse por sedimentación. Los sólidos disueltos se componen de moléculas orgánicas, moléculas inorgánicas e iones que se encuentran disueltos en el agua.

Cada una de las categorías de sólidos puede ser, a su vez, dividida en función de su volatilidad a  $550 \pm 50$  1°C. a esta temperatura la fracción orgánica se oxidará y desaparecerá en forma de gas quedando la fracción inorgánica en forma de cenizas.

De ahí que se emplean los términos «Sólidos Volátiles» y «Sólidos Fijos» para hacer referencia, respectivamente, a los componentes orgánicos e inorgánicos (o minerales) de los sólidos en suspensión.



**Figura 2:** Clasificación de las partículas sólidas contenidas en un agua residual, según su diámetro.

Fuente: Silva (2004). Evaluación y Rediseño del Sistema de Lagunas de Estabilización de la Universidad de Piura.

### b. Características químicas

Las características químicas estarán dadas, principalmente, en función de los desechos que ingresan al agua servida.

- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO):** El parámetro de contaminación orgánica más empleado, la DBO a 5 días ( $DBO_5$ ). La determinación del mismo está relacionada con la medición de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica.

Los resultados de los ensayos de  $DBO_5$  se emplean para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente, dimensionar las instalaciones de tratamientos de aguas residuales, medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento y controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos.

- **Demanda química de oxígeno (DQO):** Este ensayo se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de aguas naturales como aguas residuales.

En el ensayo se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de materia orgánica que puede oxidarse. La DQO de un agua residual suele ser mayor que la DBO, debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por la vía química frente a los que se oxidan por vía biológica.

La relación  $DBO_5/DQO$  es un factor importante, que indica la biodegradabilidad de las aguas residuales urbanas (ver Tabla 6), entendiéndose por biodegradabilidad, la característica de algunas sustancias químicas de poder ser utilizadas como sustrato por microorganismos, que las emplean para producir energía (por respiración celular), y crear otras sustancias como aminoácidos, nuevos tejidos y nuevos organismos.

**Tabla 6:**

**Tipos de agua residual según la relación de biodegradabilidad**

BIODEGRADABILIDAD DEL AGUA RESIDUAL	$DBO_5/DQO$
Alta	0.4
Normal	0.2 a 0.4
Baja	0.2

**Fuente:** Metcalf y Eddy (1998).

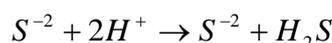
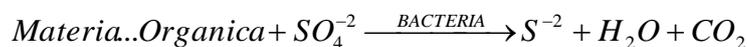
- **pH:** El intervalo de concentración idóneo para la existencia de la mayoría de la vida biológica es muy estrecho y crítico. El agua residual con una concentración adversa de ion hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos. Por lo general, el pH óptimo para el crecimiento de los organismos se encuentra entre 6.5 y 7.5.
- **Cloruros:** Proceden de la disolución de suelos y rocas que los contienen y que están en contacto con el agua, intrusión del agua salada (zonas costeras), agua residual doméstica, agrícola e industrial. Suministra información sobre el grado de concentración del agua residual.

- **Alcalinidad.** La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoníaco. De entre ellos, los más comunes son el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio. La alcalinidad ayuda a regular los cambios de pH producidos por la adición de ácidos. Normalmente el agua residual es alcalina, propiedad que adquiere de las aguas de tratamiento, el agua subterránea y los materiales añadidos en los usos domésticos.
- **Nitrógeno.** Recibe el nombre de nutriente y bioestimulante. Es básico para la síntesis de proteínas. El contenido total en nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito, nitrato.

El nitrógeno del nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en las aguas residuales. Cuando el efluente secundario deba ser recuperado para la recarga de agua subterránea, la concentración del nitrato es importante. La concentración de nitratos en efluentes puede variar entre 0 y 20 mg/L en forma de nitrógeno(N), con valores típicos entre 15 y 20 mg/L.

- **Fósforo.** Este es 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 vertidos de aguas residuales domésticas, industriales y a través de escorrentía naturales. El contenido de fósforo en aguas residuales municipales puede variar entre 4 y 15 mg/L.
- **Azufre.** El ion sulfato se encuentra, de forma natural, tanto en la mayoría de las aguas de abastecimiento como en el agua residual. 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 químicamente a

sulfuros y a sulfuros de hidrogeno ( $H_2S$ ) bajo la acción bacteriana en condiciones anaeróbicas. A continuación, se explicitan las reacciones generales típicas que rigen estos procesos:



Los sulfatos se reducen a sulfuros en los digestores de fangos, y pueden alterar el normal desarrollo del proceso de tratamiento biológicos si la concentración de sulfuro excede los 200mg/l. afortunadamente, estas concentraciones raramente se alcanzan.

- **Metales pesados.** Como constituyentes importantes de muchas aguas, también se encuentran cantidades, a nivel de traza, de muchos metales. Entre ellos podemos destacar el níquel (Ni), el manganeso (Mn), el plomo (Pb), el cromo (Cr), el cadmio (Cd), el cinc (Zn), el cobre (Cu), el hierro (Fe) y el mercurio (Hg). Muchos de estos metales también están catalogados como contaminantes prioritarios. Algunos de ellos son imprescindibles para el normal desarrollo de la vida biológica, y la ausencia de cualquiera de ellos podría limitar el crecimiento de las algas.
- **Gases.**

Las aguas residuales contienen diversos gases con diferente concentración.

**Oxígeno disuelto:** es el más importante, y es un gas que va siendo consumido por la actividad química y biológica. La presencia de oxígeno disuelto en el agua residual evita la formación de olores desagradables. La cantidad de oxígeno disuelto depende de muchos factores, como temperatura, altitud, movimientos del curso receptor, actividad biológica, actividad química, etc.

**Ácido sulfhídrico:** se forma por la descomposición de la materia orgánica que contiene azufre o por la reducción de sulfitos y sulfatos minerales. Su presencia, que se manifiesta fundamentalmente por los olores que produce, es un indicativo de la evolución y estado de un agua residual.

**Anhídrido carbónico:** se produce en la fermentación de los compuestos orgánicos de las aguas residuales negras.

**Metano:** se forma en la descomposición anaerobia de la materia orgánica por la reducción bacteriana del  $\text{CO}_2$ .

### c. Características biológicas

Se tomará conocimiento de los principales grupos de microorganismos biológicos y organismos patógenos presentes en las aguas residuales, así como aquellos que intervienen en los tratamientos biológicos.

- **Microorganismos.** Los principales grupos de organismos presentes en las aguas residuales se clasifican en eucariotas, eubacterias y arqueobacterias.
- **Bacterias.** Se pueden clasificar como eubacterias procariotas unicelulares. Los *Escherichiacoli*, organismo común en heces humanas, miden del orden de 0,5 micras de ancho por dos micras de largo. Las bacterias trabajan en la descomposición y estabilización de la materia orgánica. Los coliformes se emplean como indicadores de la contaminación por desechos humanos.
- **Hongos.** Los hongos son protistas eucariotas aerobios, multicelulares, no fotosintéticos y quimioheterótrofos. Muchos de los hongos son saprófitos, basan su alimentación en materia orgánica muerta. Juntos con las bacterias los hongos son los principales responsables de la descomposición del carbono en la bioesfera.

- **Algas.** Las algas pueden presentar serios inconvenientes en las 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 de grandes colonias flotantes de algas. Los crecimientos explosivos son característicos de los llamados lagos eutróficos, que son lagos con gran contenido en compuestos necesarios para el crecimiento biológico. Puesto que el efluente de las plantas de tratamiento de agua residual suele ser rico en nutrientes biológicos, la descarga del efluente en los lagos provoca su enriquecimiento y aumenta la tasa de eutrofización. En los ríos pueden producirse efectos análogos.
- **Organismos patógenos.** Los principales organismos patógenos presentes en 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 como la fiebre tifoidea y paratifoidea, la disentería, diarreas y cólera.

### 2.3.7 Niveles y procesos de tratamiento de aguas residuales

En términos generales, en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ocurren operaciones, procesos físicos, químicos y biológicos.

Se puede considerar que las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en estos procesos son las mismas que se realizan en la naturaleza (ríos, lagos, suelo, etc.) sólo que en forma controlada dentro de tanques o reactores y a velocidades mayores.

En la Tabla 7 se puede apreciar el nivel, descripción y tipo de unidad de estructura de tratamiento:

**Tabla 7:**

**Niveles y procesos de tratamiento de aguas residuales**

NIVEL	DESCRIPCIÓN	TIPO DE UNIDAD
Preliminar	<p>Tiene como objetivo la retención de sólidos gruesos y sólidos finos con densidad mayor al agua y arenas, con el fin de facilitar el tratamiento posterior. Son usuales el empleo de canales con rejas gruesas y finas, desarenadores, y en casos especiales se emplean tamices. Estas unidades, en ocasiones obviadas en el diseño de plantas de tratamiento, son necesarias para evitar problemas por el paso de arena, basura, plásticos, etc., hacia los procesos de tratamiento propiamente dichos.</p>	<p>Rejas, tamices, desarenador, tanques de homogenización, trampas de grasa, medidor y repartidos de caudal</p>
Primario	<p>Se considera como unidad de tratamiento primario a todo sistema que permite remover material en suspensión, excepto material coloidal o sustancias disueltas presentes en el agua. Así, la remoción del tratamiento primario permite quitar entre el 60 a 70% de sólidos suspendidos totales y hasta un 30% de la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) orgánica sedimentable presente en el agua residual. Es común en zonas rurales el empleo del tanque séptico como unidad de tratamiento primario con disposición final por infiltración. El tanque Imhoff ha sido empleado en localidades de mediano tamaño como un buen sistema de tratamiento primario.</p>	<p>Sedimentador, unidades con inyección de aire, tanque séptico, Imhoff y tanques de flotación</p>
Secundario	<p>El fundamento del tratamiento secundario es la inclusión de procesos biológicos en los que predominan las reacciones bioquímicas, generadas por microorganismos que logran eficientes resultados en la remoción de entre el 50% y el 95% de la DBO.</p>	<p>Lodos activados, biodiscos, filtros percoladores, humedales, lagunas de estabilización, reactor UASB.</p>

... continuación

NIVEL	DESCRIPCIÓN	TIPO DE UNIDAD
Terciario	La necesidad de implementar un tratamiento terciario depende de la disposición final que se pretenda dar a las aguas residuales tratadas. El tratamiento de nivel terciario tiene como objetivo lograr fundamentalmente la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Usualmente, la finalidad del tratamiento de nivel terciario es evitar que la descarga del agua residual, tratada previamente, ocasione la eutroficación o crecimiento generalizado de algas en lagos, lagunas o cuerpos de agua de baja circulación, ya que ello desencadena el consumo de oxígeno disuelto con los consecuentes impactos sobre la vida acuática del cuerpo de agua receptor.	Microfiltración, la coagulación y precipitación, la absorción por carbón activado, cloración, destilación, oxidación química, extracción por solvente, remoción por espuma, nitrificación – desnitrificación.

Fuente: RNE - Norma OS. 090 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

En la Tabla 8 se muestran los rendimientos medios de depuración que se alcanzan en función del tipo de tratamiento aplicado a las aguas residuales urbanas.

**Tabla 8:**

**Rendimientos (%) en las etapas de depuración de las aguas residuales**

Etapa de depuración	Sólidos en suspensión	DBO5	E. coli
Pretratamiento	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:** Alianza por el Agua. Manual de depuración de aguas residuales urbanas

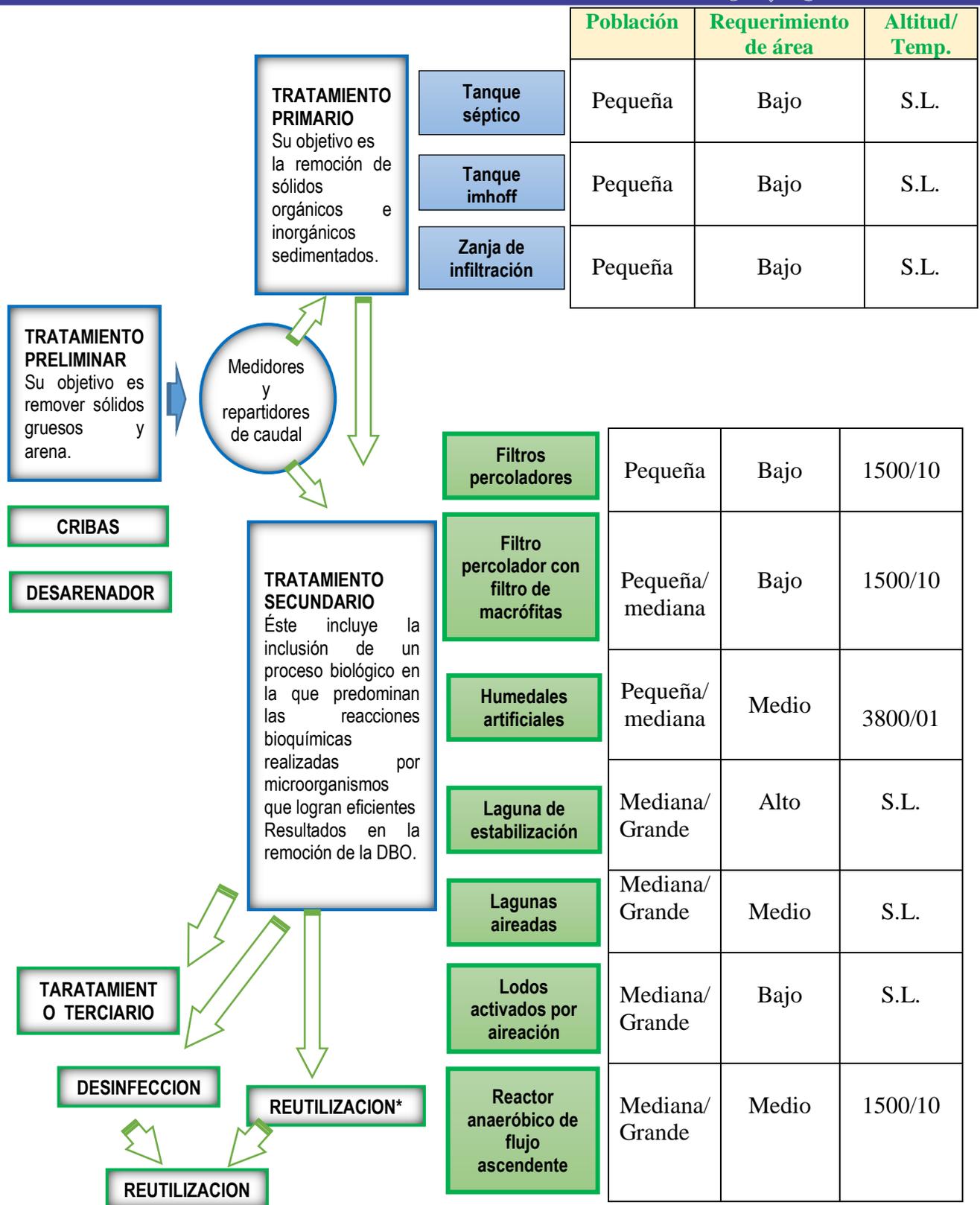


Figura 3: Flujograma de tecnologías empleadas en el tratamiento de Aguas Residuales.

**Nota:** Los datos mostrados sobre niveles de población son referenciales, pues hay que considerar entre otros factores el costo beneficio por habitante.

\* Considerar la calidad del efluente para definir el tipo de uso.

**S.L.:** Sin Límite. Se debe tomar en cuenta que a mayor altitud la eficiencia de los sistemas generalmente disminuye e incrementan los costos.

**Altitud:** Metros sobre el nivel del mar (msnm).

**Temperatura:** en grados centígrados. (°C)

**Interpretación de 1500/10:** Sistema de tratamiento comprobado que funciona bien hasta los 1500 msnm o a temperaturas superiores a 10°C. (lo mismo para 3800 / 01). A mayores altitudes no se tiene referencia.

### 2.3.8 Tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de estabilización.

#### a. Lagunas de estabilización

Según Guevara (1996) las lagunas de estabilización son sistemas de tratamientos para aguas servidas en las cuales, mediante la acción conjunta de algas, bacterias y otros organismos, se logra la estabilización biológica de materia orgánica biodegradable presente en el desecho. El tratamiento de las aguas residuales a través de lagunas consiste en forma sintetizada en:

- Reducir el contenido de sólidos suspendidos por sedimentación
- Satisfacer la Demanda Bioquímica de Oxígeno
- Estabilizar los compuestos orgánicos biodegradables.
- Reducir el número de organismos patógenos.

Las lagunas de estabilización son una alternativa económica en la remoción de patógenos y helmintos que no lo tienen los sistemas tradicionales, además en este sistema no es necesario utilizar cloro para la desinfección del efluente y no necesitan partes mecánicas, reflejándose en un ahorro en los costos de adquisición, operación y mantenimiento. Se puede utilizar como único tratamiento o como parte de otras etapas de tratamiento a saber, primario, secundario o terciario.

### **b. Objetivos de las lagunas de estabilización.**

Según Cuervo (1987) el objetivo primordial del tratamiento de las aguas residuales por medio de lagunas de estabilización, es la remoción de parásitos, bacterias y virus patógenos, que tomando como base el período de retención, las lagunas pueden lograr la remoción total de patógenos, es decir, que su construcción es para la protección epidemiológica, mediante la disminución de organismos patógenos presentes en las aguas residuales, asimismo, la protección ecológica, disminuyendo la carga orgánica (DBO) de las aguas residuales. Lográndose de esta manera que el nivel de oxígeno disuelto (OD) en los cuerpos receptores se vea menos comprometido, con el consiguiente beneficio para los peces y demás organismos acuáticos.

### **c. Procesos de estabilización**

Las lagunas constituyen un ecosistema acuático cuyos distintos integrantes son:

- Productores: algas
- Consumidores: protozoarios rotíferos, larvas de insectos.
- Depredadores: bacterias y hongos

Al existir una cadena trópica, unos organismos se alimentan de otros y hay transporte de energía. Las algas y las bacterias existen en las lagunas de estabilización de manera que unas dependen de las otras. Las bacterias utilizan oxígeno disuelto producido por las algas y estas utilizan el CO<sub>2</sub> de la actividad bacterial como fuente de carbono en la producción de nuevas algas.

### **2.3.9 Clasificación de las lagunas**

Las lagunas pueden clasificarse en base a varias características.

**a. De acuerdo al régimen de flujo:**

- **Flujo pistón.** Ocurre cuando la dispersión de contaminantes es muy pequeña menor o igual a 0.2, esto se cumple cuando la relación largo-ancho es igual o mayor a 3.
- **Mezcla completa.** Cuando la dispersión en una laguna es muy grande (mayor o igual a 10), esto ocurre cuando la relación largo-ancho es menor de 1 (se considera el largo de la laguna la longitud del sentido del flujo). La concentración de contaminantes en este tipo de lagunas es homogénea en todo el estanque, generalmente en este tipo de lagunas representan cortos circuitos.
- **Flujo disperso.** La dispersión se encuentra entre 0.2 y 1, la relación geométrica largo-ancho en estas lagunas es de 1 a 3.

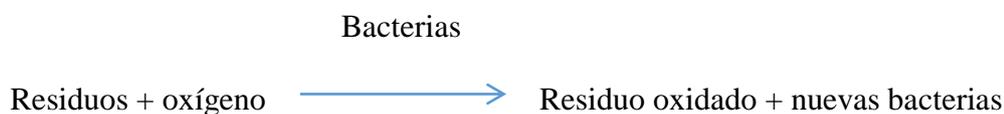
El tipo de flujo que presenta una mayor eficiencia de remoción de contaminantes es el flujo pistón, esto se logra con relaciones largo-ancho mayor de 3.

**b. De acuerdo al contenido de oxígeno:**

Según Cuervo (1987) existen varias formas de clasificar las lagunas. De acuerdo con el contenido de oxígeno, pueden ser: aeróbicas, anaeróbicas y facultativas.

- **Lagunas aeróbicas.** También han sido también referidas como fotosintéticas, son estanques de profundidad reducida (0.5 a 1.0 m) y diseñadas para una máxima producción de algas. En estas lagunas se mantienen condiciones aeróbicas a todo nivel y tiempo, y la reducción de materia orgánica es efectuada por acción de organismos aerobios. Estas unidades han sido utilizadas preferentemente para propósitos de producción y cosecha de algas y su uso en tratamiento de desechos no es generalizado.

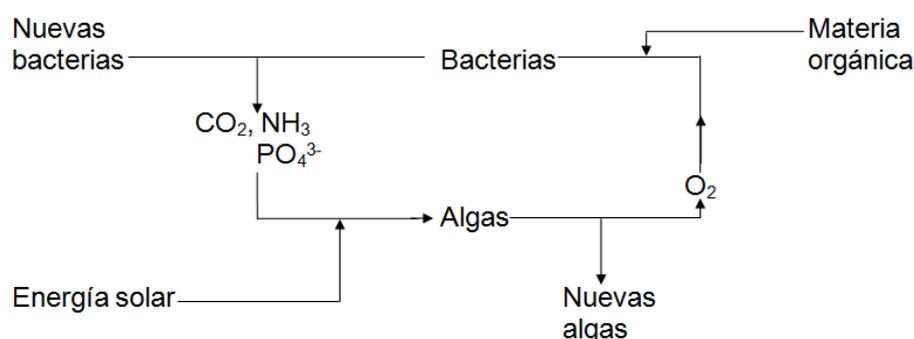
La oxidación biológica aerobia es la conversión bacteriana de los elementos de su forma orgánica a su forma inorgánica altamente oxidada, tal y como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4. Oxidación biológica aerobia**

Fuente: Romero (2001).

Una laguna aerobia contiene principalmente algas y bacterias en suspensión. El oxígeno liberado por las algas, a través del metabolismo fotosintético, es usado por las bacterias en la descomposición aerobia de la materia orgánica. A la vez, los nutrientes y el dióxido de carbono producidos por la actividad bacteriana son usados por las algas. La relación simbiótica algas-bacterias se acostumbra representarla esquemáticamente como se indica en la figura 5.



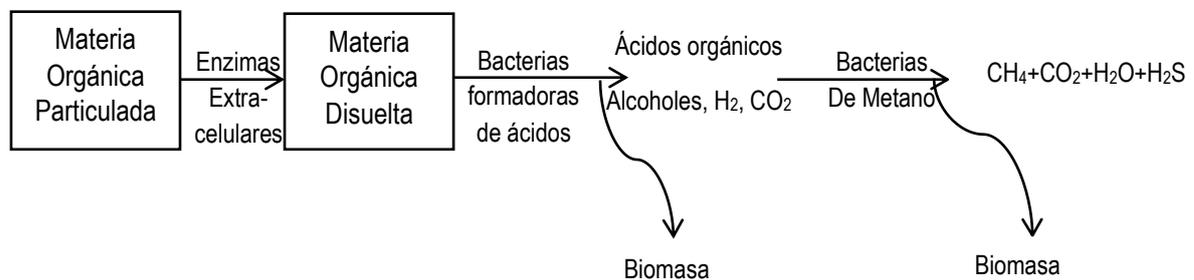
**Figura 5. Relación simbiótica algas-bacterias**

Fuente: Romero (2001).

- **Lagunas anaeróbicas.** Son reservorios de mayor profundidad (2.5 a 5.0 m) y reciben cargas orgánicas más elevadas, de modo que la actividad fotosintética de las algas es suprimida, encontrándose ausencia de oxígeno en todos sus niveles. En estas condiciones, estas lagunas actuarán como un digestor anaeróbico abierto sin mezcla y debido a las altas cargas orgánicas que soportan, el efluente contiene un alto

porcentaje de materia orgánica que requiere de otro proceso adicional para complementar el tratamiento.

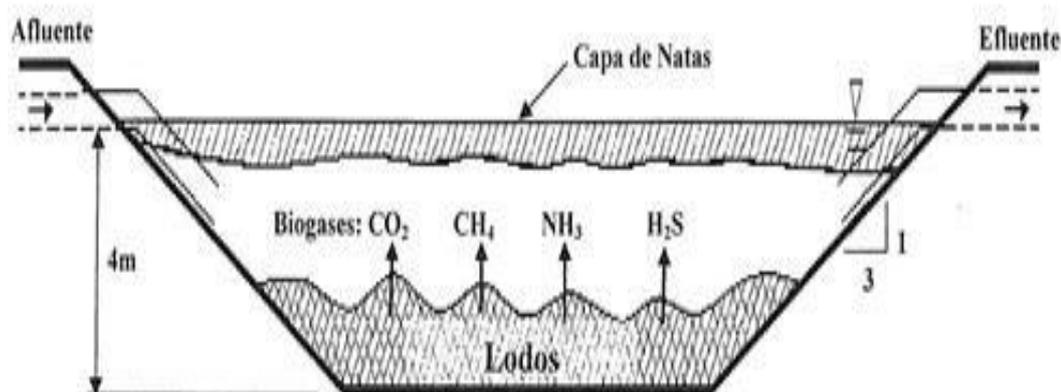
La digestión anaerobia es capaz de degradar biológicamente sustancias orgánicas complejas en ausencia de oxígeno disuelto: este proceso se realiza en dos fases con auxilio de dos grupos diferentes de bacterias. En la primera fase un grupo de bacterias llamado colectivamente “Bacterias acidófilas” o bacterias formadoras de ácidos, se caracterizan por su capacidad de alimentarse de la materia orgánica cruda; multiplicando su número y generando ácidos orgánicos volátiles (COV), bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua para estabilizar la materia orgánica. En la segunda fase, un grupo de bacterias llamadas “Metanógenas” convierten los ácidos orgánicos volátiles a metano ( $\text{CH}_4$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y otros gases tal como se representa en la Figura 6.



**Figura 6. Descomposición anaerobia del agua residual**

Fuente: Romero (2001).

En este proceso la temperatura y el tiempo de retención juegan un papel muy importante. Las últimas investigaciones recomiendan diseñar por carga volumétrica y que se tenga en cuenta que, en este tipo de lagunas, debe considerarse que si se utilizan cargas inadecuadas se pueden generar malos olores. El diagrama de una laguna anaerobia se puede apreciar en la Figura 7.



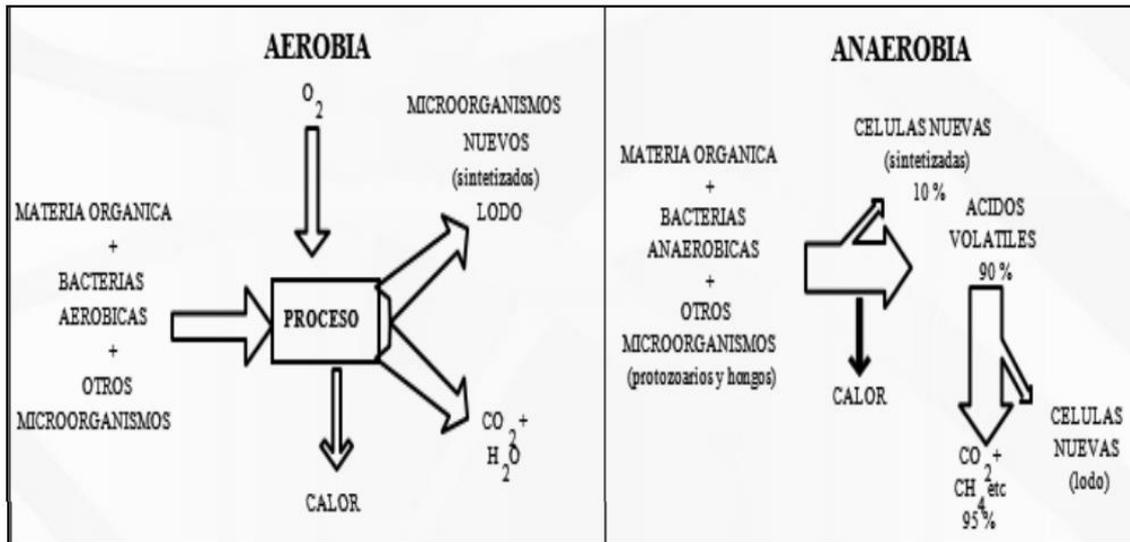
**Figura 7. Diagrama de una laguna anaerobia**

Fuente: Oakley (2011). Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Centroamérica, Manual de Experiencias, Diseño, Operación y Sostenibilidad.

En lo referente a la carga de diseño superficial, no existe un procedimiento que defina el límite exacto en el que una laguna trabajara al 100% en forma anaerobia, o si se desarrollan en determinadas horas del día a temperaturas puntuales procesos facultativos; en la práctica se ha observado que con cargas mayores de 1000 kg de DBO/Ha/día el proceso que se genera es anaerobio. El CEPIS recomienda trabajar con cargas mínimas de 1000 kg/ha.d.

El proceso anaerobio de una laguna se desarrolla en forma satisfactoria entre los 15 y 35 °C, a temperaturas menores, se produce una disminución en la actividad de los microorganismos. Si la temperatura baja a menos de 4 °C por tiempos prolongados las bacterias pueden morir, desestabilizando el sistema y volviéndolo completamente ineficiente.

La Figura 8 presenta las diferencias entre los procesos aerobios y anaerobios y en la Tabla 9 se presenta ventajas y limitaciones de los procesos aerobio y anaerobio.



**Figura 8: Proceso aerobio y proceso anaerobio**  
Fuente: Suarez (2011).

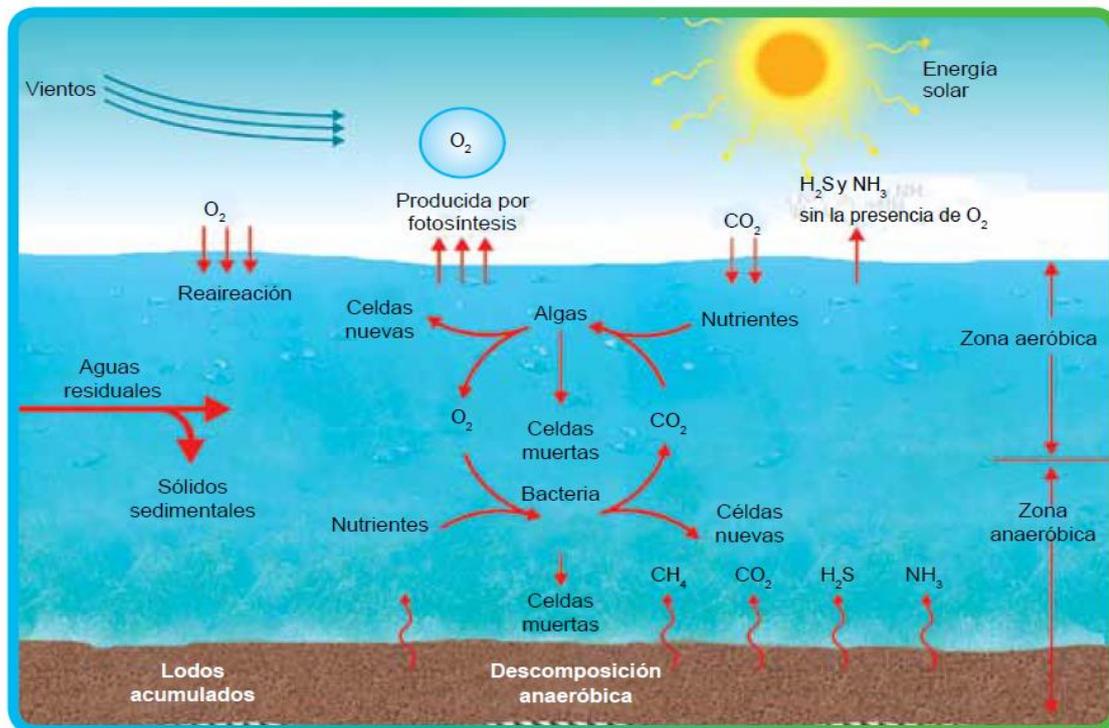
**Tabla 9:**

**Ventajas y limitaciones de los procesos aerobio y anaerobio**

Aerobio	Anaerobio
- $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$	- $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3 CO_2 + 3 CH_4$
- Mayor producción de lodos	- Menor producción de lodos
- Operatividad comprobada	- Menores costos de operación
- 50% de C es convertido en CO <sub>2</sub> , 40-50% es incorporado dentro de la masa microbiana	- 95% de C es convertido en biogas; 5% es transformado en biomasa microbiana
- 60% de la energía es almacenada en la nueva biomasa, 40% es perdido como calor	- 90% de la energía es retenida como CH <sub>4</sub> , 3-5% es perdido como calor, 5- 7% es almacenada en la biomasa
- Ingreso de elevada energía para aireación	- No requiere de energía
- Limitación de cargas orgánicas	- Acepta altas cargas orgánicas
- Se requiere adición de nutrientes	- Requerimiento bajo de nutrientes
- Requerimiento de grandes áreas	- Se requiere pequeña área superficial
- Periodos de arranque cortos	- Largos periodos de arranque
- Baja generación de olores	- Generación de olores molestos

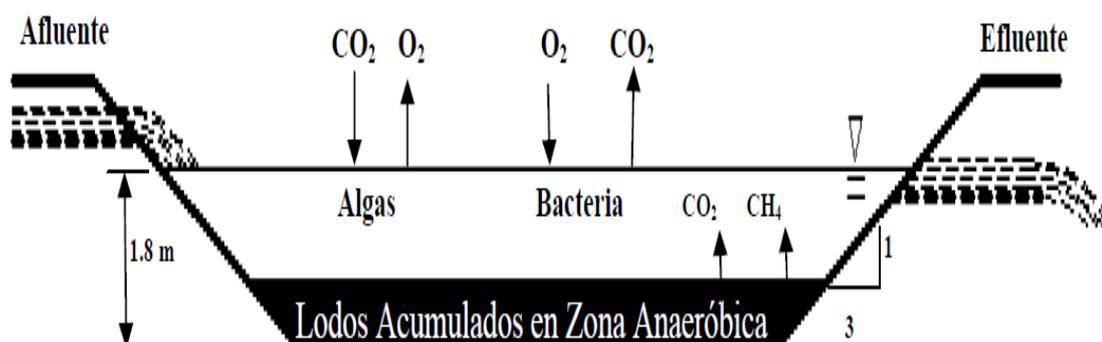
**Fuente:** Suarez (2011).

- **Lagunas facultativas.** Son estanques de profundidad más reducida (1.5 a 2.5 m), en las cuales la actividad fotosintética de las algas ejerce un papel preponderante en la capa superior, al mantener un cierto nivel de oxígeno disuelto que varía de acuerdo a la profundidad y hora del día. En zona del fondo se depositan los sólidos suspendidos que sufren un proceso de reducción por estabilización anaerobia. Los procesos de estabilización que se llevan a cabo en las lagunas facultativas son muy diferentes de los que se lleva a cabo en las lagunas anaeróbicas, ambos procesos son efectivos en las aguas residuales llevando la estabilización de la materia orgánica a través de acción de organismos aeróbicos cuando hay oxígeno disuelto en el agua, o a través de organismo anaeróbicos cuando en el mismo no hay oxígeno disuelto, proceso que aprovecha el oxígeno que existe en las moléculas de la materia que están degradando (ver Figura 9 y Figura 10).



**Figura 9: La interacción de bacterias y algas en las zonas aeróbicas y anaeróbicas en una laguna facultativa de estabilización.**

Fuente: Oakley (2011). Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Centroamérica, Manual de Experiencias, Diseño, Operación y Sostenibilidad.



**Figura 10: Un diagrama de una laguna facultativa**

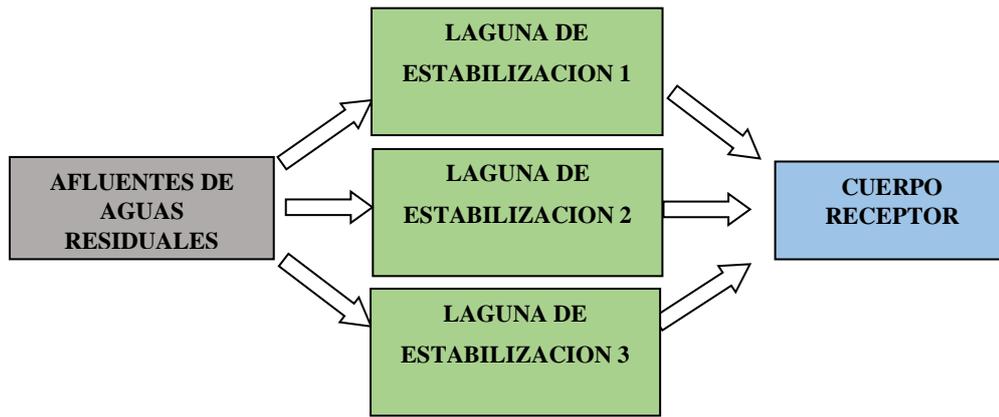
Fuente: Oakley (2011). Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Centroamérica, Manual de Experiencias, Diseño, Operación y Sostenibilidad.

### c. De acuerdo al modelo de operación

El tratamiento de aguas residuales se puede efectuar en una, dos o más lagunas; cada laguna se denomina célula y el conjunto, sistema de lagunas. La experiencia ha demostrado que el tratamiento biológico en una serie de lagunas es más eficiente que en una laguna de área equivalente.

- **Operación en paralelo:** Cuando se desea reducir la carga orgánica de células primarias. En este tipo de sistema, dos o más células, reciben, simultáneamente, cargas orgánicas proporcionales a sus capacidades y pueden recibir residuales brutos o efluentes parcialmente tratados de unidades que las preceden. Este arreglo proporciona mejor distribución de sólidos sedimentables y la flexibilidad de retirar, provisionalmente, una célula para limpieza y distribuir, durante esa fase, la carga a las demás unidades (ver Figura 11).

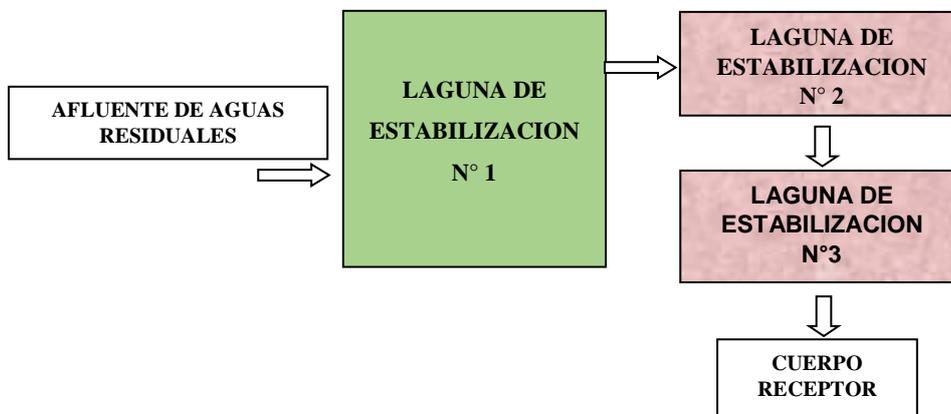
El contar con por lo menos dos lagunas, permite sobre cargar una mientras se lleva a cabo la limpieza de la otra. Cuando el terreno es muy quebrado y no se requiere hacer lagunas alargadas, el uso de lagunas en paralelo a diferentes niveles, permite lograr economía considerable en el movimiento de tierras.



**Figura 11: Lagunas de estabilización conectadas en paralelo**

Fuente: Elaboración propia

- **Operación en serie:** Cuando una laguna recibe el efluente de la laguna que le precede. Particularmente en caso de ser usadas tres o más lagunas. En este tipo de arreglo, el líquido fluye de una unidad a la otra. La primera célula recibe el residual bruto y se llama laguna o célula primaria, la segunda recibe el efluente tratado por la primera y se llama secundaria y así sucesivamente. Normalmente, tratándose de residuales sanitarios, una tercera laguna se considera de maduración o pulimento. Este sistema tiende a minimizar las cantidades de algas y otros contaminantes en la última célula, obteniéndose un efluente de mejor calidad. En la Figura 12 se presenta un esquema de lagunas que operación en serie.



**Figura 12: Lagunas de estabilización conectadas en serie**

Fuente: Elaboración propia

- **Lagunas con recirculación del efluente**, para operaciones en serie o en paralelo

**d. De acuerdo a su ubicación:**

- Primarios o de aguas residuales crudas
- Secundarias (reciben efluentes de otros procesos de tratamiento)
- De maduración (si su finalidad es reducir el número de organismos patógenos o su empleo en cultivos de algas).

De todos los procedimientos de diseño de procesos de tratamiento biológicos, quizá sea el menos definido el de las lagunas de estabilización. Por ello, son numerosos los métodos que aparecen en la bibliografía y cuando se comparan los resultados obtenidos por cada uno de ellos son muchas las diferencias que se encuentran. Sin embargo, existen factores comunes que inciden en su funcionamiento, como son: la carga orgánica por unidad de área, la temperatura y patrones de viento, tiempo de retención real, dispersión y características de mezcla, energía solar, características de sólidos en el efluente, cantidad disponible de nutrientes esenciales para el metabolismo microbial.

### **2.3.10 Ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización**

**a. Ventajas:**

- Presenta alta eficiencia
- Costo inicial bajo
- Gastos de operación y mantenimientos bajos.
- Simplicidad de operación
- No requiere de equipo mecánico

- Pueden recibir y retener grandes cantidades de agua residual, soportando sobrecargas hidráulicas y orgánicas con mayor flexibilidad, comparativamente con otros tratamientos.
- Formación de biomasa más efectiva y variada que en los procesos de tratamiento con tanque séptico y con tanque Imhoff.
- No requieren de instalaciones complementarias para la producción de oxígeno, el mismo se produce en forma natural dentro del sistema.
- Debido a los tiempos de retención prolongados y a los mecanismos del proceso, son sistemas altamente eficaces para la remoción de bacterias, virus y parásitos, comparativamente con otros tratamientos.
- Bajos costos de mantenimiento y mínimo manejo de lodos.
- No requiere de personal calificado.

**b. Desventajas:**

- Requiere de grandes áreas de terreno para su implantación, si precio del terreno es alto, puede salir costosa.
- Es un sistema sensible a las condiciones climáticas.
- Puede producir vectores.
- Puede ocasionar problemas de olores (generalmente las lagunas anaeróbicas)
- En época de frío disminuye su eficiencia.

### **2.3.11 Remoción de patógenos y parámetros convencionales**

La tabla 14 presenta un resumen de los varios procesos de tratamiento de aguas residuales en términos de remoción de patógenos y los parámetros convencionales de demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) y sólidos suspendidos (SS) (Oakley, 2011).

Se ve claramente que las lagunas de estabilización son la mejor opción para la remoción de patógenos; las lagunas de estabilización que están diseñadas y operadas

apropiadamente tienen la mejor eficiencia en la remoción de virus bacterias y especialmente huevo de helmintos y quistes de protozoarios. Todos los otros procesos requieren desinfección como un proceso terciario para obtener una remoción de bacterias o virus igual a la que las lagunas pueden alcanzar mediante un proceso secundario; además, el cloro no puede matar totalmente los huevos de helmintos y los quistes de protozoarios. La laguna es el único proceso que, como un proceso secundario, puede producir efluentes de una calidad que puede utilizarse para riego en la agricultura o para la fuente de agua en acuicultura (ver Tabla 10).

**Tabla 10:****Eficiencia de remoción de patógenos y parámetros convencionales para varios procesos**

Proceso	Remoción		Remoción, ciclos $\log_{10}$ <sup>4</sup>			
	DBO <sub>5</sub>	SS	Virus	Bacterias	Huevos de helmintos	Quistes de protozoarios
Sedimentación primaria	25-40	40-70	0-1	0-1	0-1	0-2
Lodos activados <sup>1</sup>	55-95	55-95	1-2	0-2	0-1	1-2
Filtros percoladores <sup>1</sup>	50-95	50-90	1-2	0-2	0-1	1-2
Desinfección con cloro	...	...	0-4	2-6	0-1	0-3
Lagunas en serie <sup>2</sup>	70-95	55-95 <sup>3</sup>	2-4	2-6	2-4 (100%)	2-4 (100%)

**Nota.** 1. Precedidos y seguidos de sedimentación

2. Dependiendo del número de lagunas en serie, tiempo de retención hidráulica y factores de diseño físico.
3. El efluente de lagunas puede contener altas concentraciones de SS en forma de algas.
4. 1 ciclo  $\log_{10}$ =90% remoción: 2 ciclos=99%; 3 ciclos=99.9%, etc. Las lagunas pueden remover 100% de los huevos de helmintos y 100% de los quistes de protozoarios.

Fuente: Oakley (2011).

Oakley (2011) llegó a la conclusión de que las infecciones por helmintos constituyen el riesgo más peligroso para la salud en relación con el tratamiento de aguas residuales, cuando se utiliza el efluente para riego (uso directo o indirecto de agua superficial contaminada), una práctica común en América Latina que ha causado problemas discutidos anteriormente. Se concluyó que después de las infecciones de helmintos, en orden de riesgo por las infecciones serían las de protozoarios, bacterias y finalmente los virus. Por lo tanto, se puede clasificar los riesgos de patógenos en el siguiente orden (ver Tabla 11):

**Tabla 11:****Clasificación de riesgos de patógenos**

<i>Nivel de riesgo</i>	<b>Tipo de patógeno</b>
<i>Elevado</i>	Helmintos: <i>Ascaris lumbricoides</i> , <i>Ancylostoma duodenale</i> , <i>Necator americanus</i> , <i>Trichuris trichuria</i>
<i>Medio-elevado</i>	Protozoarios: <i>Entamoeba histolytica</i> , <i>Giardia lamblia</i> , <i>Cryptosporidium</i> , <i>Cyclospora</i>
<i>Medio</i>	Bacteria: <i>Eschericia coli</i> patogénica, <i>Vibrio cholerae</i> , <i>Salmonella</i> , <i>Shigella</i> , <i>Campylobacter fetus</i>
<i>Mínimo</i>	Virus: Enterovirus, Roatvirus, virus de Hepatitis A

**Fuente:** Oakley (2011).

Oakley (2011) afirma que estas conclusiones fueron también confirmadas por Feachem et al (1983) y aceptadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que ha establecido los criterios de calidad para el caso de reuso de aguas residuales en la agricultura (se utiliza coliformes fecales como un organismo indicador de patógenos de las bacterias).

### 2.3.12 Criterios de diseño y construcción de lagunas de estabilización

Se tomarán los criterios de la Norma OS 090 “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales” del RNE y guías de diseño para este tipo de infraestructura.

#### a. Consideraciones importantes

En la concepción del proyecto se deberán tener las siguientes consideraciones:

- Diseñar por lo menos con dos unidades en paralelo para permitir la operación de una de las unidades durante la época de limpieza
- Conformación de unidades, geometría, forma y número y celdas, las cuales deberán escogerse en función de la topografía del sitio y en particular de un óptimo movimiento de tierra; es decir, de un adecuado balance entre corte y relleno de los diques.
- Según recomendación del autor **Stewart M. Oakley PhD**, se debe diseñar sistemas de dos baterías de lagunas facultativas en paralelo, seguido por un mínimo de una laguna de maduración, las lagunas facultativas deben tener un mínimo de 10 días de tiempo de retención hidráulico (TRH), y las lagunas de maduración un mínimo de 5 días de TRH, para la vida útil del sistema. Con estas recomendaciones de diseño se debe de obtener 100% de remoción de parásitos y aproximadamente 3 ciclos logarítmico de remoción de coliformes fecales.
- La profundidad de la laguna facultativa deberá encontrarse entre 1.5 a 2.0 metros, para mantener condiciones aeróbicas en el primer metro de profundidad y tener espacio por abajo para la acumulación de lodos. La profundidad más utilizada es de 1.8 metros.

- Se recomienda una relación de largo ancho en lagunas facultativas de por lo menos 2/1 y preferiblemente 3/1 para modelar flujo de tipo pistón.
- La temperatura de diseño será el promedio del mes más frío (temperatura del agua), determinada a través de correlaciones de las temperaturas del aire y agua existentes.

### 2.3.13 Problemas operativos y su solución

Las lagunas de estabilización pueden presentar problemas operativos que se manifiestan por una serie de dificultades que el operador debe ser capaz de reconocer para tomar la medida correspondiente para solucionar el problema.

#### a. Señales del buen funcionamiento de las lagunas facultativas y de maduración

Las señales de buen funcionamiento son las siguientes:

- El agua del efluente tiene coloración verde brillante.
- La superficie del agua en la laguna está libre de natas y solitos flotantes.
- La ausencia de plantas acuáticas en la laguna y malezas en los taludes interiores.
- La ausencia de malos olores en la laguna.

#### b. Problemas del funcionamiento en lagunas facultativas y de maduración

Los problemas de funcionamiento más frecuentes en las lagunas son la acumulación de natas y materias flotantes; aparición de malos olores; desarrollo de coloraciones café, gris/negro, amarillo/verde, rosa o rojo, lo cual es una señal que la laguna no está funcionando bien; crecimiento de malezas y la aparición de mosquitos y otros insectos. Oakley (2011).

#### – Acumulación de natas y materias flotantes

La superficie de las lagunas debe estar libre de natas y materias flotantes. La presencia de natas y material flotante causa problemas al impedir la transferencia de

oxígeno a la laguna por la fotosíntesis (al restringir el paso de la luz), en causar malos olores por su descomposición, y en atraer mosquitos y otros insectos. La presencia puede ser causada por los siguientes factores:

- Falta de eliminación de sólidos gruesos por la rejilla en la entrada de la instalación.
- La flotación de lodos en producir en burbujeo muy activo que los lleve hasta la superficie. Esta puede ser parte del proceso normal o una señal de la sobreacumulación de lodos al fondo si hay mucha flotación de lodos en el fondo.
- Falta de mantenimiento adecuado.

La acumulación de natas y materia flotante se debe remover con un desnatador.

#### - **Malos olores**

Las razones más frecuentes de la aparición de malos olores son las siguientes:

- Sobrecarga de DBO que causa condiciones anaeróbicas. La sobrecarga puede ser causada por un sobre caudal, mal diseño, periodo de retención hidráulico demasiado bajos por cortocircuitos hidráulicos o sobreacumulación de lodos y la descomposición anaeróbica de lodos demasiado profundos al fondo de la laguna.
- Presencia de químicos tóxicos de efluentes industriales que disminuyen las actividades biológicas.
- La descomposición anaeróbica de natas y materia flotante no removida de la superficie de la laguna.

#### - **Coloraciones anormales**

Una laguna facultativa y de maduración normalmente tiene una coloración verde brillante en la salida. La entrada de una laguna facultativa puede tener una

coloración gris/café hasta el intermedio, donde debe ser verde brillante. Los siguientes aspectos son señales de mal funcionamiento de una laguna (ver Tabla 12):

**Tabla 12:**

**Señales del mal funcionamiento de una laguna**

<b>Coloración</b>	<b>Causa</b>
Café:	Reducción en actividad de fotosíntesis
Gris/negro:	Condiciones anaerobias
Amarillo/verde opaco:	Presencia de algas azules-verdes, significa baja en pH y oxígeno
Rosa o rojo	Presencia de bacterias fotosintética del azufre, los cual significa condiciones anaeróbicas

**Fuente:** Oakley (2011).

**- Crecimiento de malezas**

El crecimiento de malezas acuáticas es causado por una profundidad del agua demasiado baja, no crecen las plantas acuáticas en lagunas con una profundidad más de 1.5 m. si hay crecimiento en la orilla, esto es una señal de mal mantenimiento o falta de revestimiento adecuado. El crecimiento de malezas en los taludes es causado por mal mantenimiento.

**- Mosquitos y otros insectos**

Las lagunas no presentan problemas de mosquitos u otros insectos mientras se tengan orillas y la superficie libre de plantas acuáticas y materia flotantes, los cuales sirven como focos de reproducción de insectos. La solución es mantener siempre las lagunas limpias de plantas acuáticas y material flotante.

### **2.3.14 Proceso de evaluación en lagunas de estabilización**

Guevara (1996) indica que evaluar consiste en realizar un número de mediciones y análisis que al compararlos con los parámetros, normas y métodos preestablecidos permiten un control y manejo adecuado del proceso o sistema de tratamiento.

Evaluar incluye acciones de supervisión, inspección, vigilancia y control con el propósito de prevenir, mantener, corregir, mejorar y optimizar los procesos individuales y todo el sistema.

Según Guevara (1996) los criterios para la evaluación son: la calidad requerida en el efluente y lo que se desea controlar; todo va a depender del tamaño de las instalaciones, infraestructura, recursos existentes, personal disponible, laboratorio, etc. Las evaluaciones realizadas a los sistemas lagunares pueden ser con los siguientes propósitos:

#### **a. Una evaluación de rutina**

Los sistemas pueden fallar en momento determinado o la calidad del efluente deteriorarse, la única forma de conocer las causas del problema e indicar que acción inmediata son requeridas, es llevar una rutina de monitoreo y un programa de evaluación para poder verificar la calidad real del efluente que sale. Esta evaluación va dirigida a la medición de la calidad del efluente y a un análisis de los parámetros de control con el propósito de mejorar los procesos de tratamiento que se realizan en las lagunas de estabilización; es decir esta evaluación lo que busca es mejorar su funcionamiento, el cual debe basarse en un diagnóstico (que incluya la descripción física del sistema lagunar), en el registro histórico de los datos de campo, en la frecuencia de muestreo, en el resultado de los parámetros analizados, en el análisis y evaluación de resultados.

## **b. Una evaluación experimental de parámetros de diseño utilizados en los diferentes modelos**

Este tipo de evaluación busca propósitos específicos, los cuales son determinados por el investigador, quien en base a la idea clara que tenga de lo que quiere evaluar identificará cuales son su variables dependientes o independientes. Estas variables pueden ser referidas a la eficiencia de remoción, cinética de reducción, producción de biomasa, factores que gobiernan el submodelo hidráulico, etc.

### **2.3.15 Determinación de la eficiencia del sistema de tratamiento**

La medición de la capacidad degradativa se hace en base a la reducción lograda, luego del proceso de fermentación de las aguas servidas de los parámetros inicialmente medidos en el material de carga (afluente del sistema de lagunas), se parte del criterio que al no producirse cambios notables y recientes (menos de 6 meses), en la comunidad, tales como variación de la población, establecimiento de industrias, cambio en la composición y consumo de alimentos, etc., las muestras captadas tanto a la entrada como a la salida del sistema de lagunas, pueden considerarse como pertenecientes a un mismo proceso degradativo y por lo tanto la eficiencia puede medirse según la siguiente fórmula:

$$E = \frac{(VP_E - VP_S)}{VP_E} * 100 \dots \dots \dots 2.1$$

Donde:

E = Eficiencia degradativa (%)

VP<sub>E</sub> = Valor de parámetro a la entrada

VP<sub>S</sub> = Valor de parámetro a la salida

El parámetro que más se usa para medir la eficiencia es la DBO, DQO.

La ineficiencia para la DBO, DQO, Sólidos en todas sus formas nos indica que el sistema no está en la capacidad de degradar todas las descargas que recibe, las cuales puede estar por encima de la población de diseño o que las lagunas estén llenas de sedimentos.

Normalmente se diseña para eficiencias altas, por ejemplo, del 90%.

Finalmente, en lo referente a la DBO, para poderlo reducir más, lo recomendable es limpiar la laguna sacando los sedimentos que estén depositados y de ser posible ampliar las lagunas para aumentar su capacidad de tratamiento.

### 2.3.16 Muestreo y medición de caudal

El conocimiento de las técnicas de muestreo y su correcto uso son fundamentos para que los resultados de los análisis de las aguas, sean representativos de su calidad, por ello debe empezarse estableciendo el programa de muestreo, el cual debe consistir en los siguientes pasos:

- a) Selección del sitio de muestreo
- b) Tipo de muestra
- c) Medición o aforo del caudal
  - Método de sección y velocidad
  - Método del vertedero
  - Canales de Parshall
  - Método de volumen y tiempo

Según Guevara (1996) un criterio técnico, es que se tomen muestras, en las estaciones más favorables y menos favorables del año, cuando el funcionamiento de la laguna sea el mejor y el peor, lo cual significa tomar muestras en los **meses más cálidos y más fríos del año.**

### a. Sitio y tipo de muestras de acuerdo a los parámetros

A continuación en la Tabla 13, se presenta el sitio y tipo de muestro que se pueden realizar para la evaluación de las características físico químicas y microbiológicas.

**Tabla 13:**

#### Sitio y tipo de muestreo

Parámetros	Sitio de muestreo	Tipo de muestra
Gasto	Entrada y salida	-----
pH	Entrada y salida	Simple
Temperatura	Dentro	-----
Prof. De lodos	Dentro	-----
DBO5	Entrada y salida	Compuesta
DQO	Entrada y salida	Compuesta
Solidos suspendidos	Entrada y salida	Compuesta
Nitrógeno total	Entrada y salida	Compuesta
Nitrógeno amoniacal	Entrada y salida	Compuesta
Fosforo total	Entrada y salida	Compuesta
Sulfuros	Salida	Compuesta
Sulfatos	Salida	Compuesta
Conductividad eléctrica	Salida	Compuesta
Coliformes fecales	Entrada y salida	Compuesta
Nemátodos intestinales	Salida	Compuesta

**Fuente:** Guevara (1996).

### b. Frecuencia de muestreo

En las tablas 14, 15 y 16, se indican los parámetros a ser evaluados, así como las frecuencias de muestreos para determinar las características generales de

funcionamiento de las lagunas de estabilización del tipo anaerobio y facultativo y las listas de los parámetros operacionales y de monitoreo correspondientes a tres niveles o etapas de control que van desde un programa inicial calificado como “básico”, hasta un nivel máximo o “avanzado”, el nivel intermedio está representado por “medio”.

Se indican los parámetros operacionales y de monitoreo a ser evaluados, correspondientes a tres niveles o etapas de control que van desde un programa inicial calificado como “básico”, hasta un nivel máximo o “avanzado”, el nivel intermedio está representado por “medio”.

**Tabla 14:****Características generales de las lagunas y frecuencia de muestreo**

PÁRAMETRO	LUGAR DE MUESTREO	NIVEL DE CONTROL		
		BÁSICO	MEDIO	AVANZADO
<b>Observaciones en Lagunas</b>				
Apariencia		Quincenal	Semanal	Diario
Lodos Flotantes	Lagunas	Quincenal	Semanal	Diario
Natas	Anaeróbicas y	Quincenal	Semanal	Diario
Olor	Facultativas	Quincenal	Semanal	Diario
Vegetación en Diques		Quincenal	Semanal	Diario
Vegetación en Lagunas		Quincenal	Semanal	Diario
Estado de Diques		De acuerdo a la Demanda		
Mantenimiento				
Cantidad de Residuos				
Espesor de Lodos		C/6 meses	C/3 meses	C/mes
Infiltración		-----	C/4 meses	C/mes

**Fuente:** OPS/OMS

**Tabla 15:**

**Parámetros operacionales y frecuencia de muestreo**

PÁRAMETRO	LUGAR DE MUESTREO	NIVEL DE CONTROL		
		BÁSICO	MEDIO	AVANZADO
<b>Observaciones en lagunas</b>				
pH	Lagunas			
Oxígeno disuelto	Anaeróbicas y	Semanal	C/ 2 días	Diario
Conductividad eléctrica	Facultativas			
Temperatura				
Caudal	Afluente y Efluente	Diario	Diario	C/6horas

**Fuente:** OPS/OMS

**Tabla 16:**

**Parámetros de monitoreo y frecuencia de muestreo**

PÁRAMETRO	LUGAR DE MUESTREO	NIVEL DE CONTROL		
		BÁSICO	MEDIO	AVANZADO
<b>Físico - Químicos</b>				
DBO				
DQO				
Sólidos Totales				
Sólidos suspendidos totales	Afluente y Efluente	c/4 Meses	C/2 Meses	C/Semana
Sólidos suspendidos volátiles				
Sólidos Sedimentables				
Nitrógeno Orgánico	Afluente y	c/4 Meses	C/2	C/Semana
Nitrógeno Amoniacal	Efluente		Meses	
Fósforo Total				
Aceites y grasas				

... Continuación

PÁRAMETRO	LUGAR DE MUESTREO	NIVEL DE CONTROL		
		BÁSICO	MEDIO	AVANZADO
<b>Biológicos</b>				
Coliformes Totales				
Coliformes Fecales				
Helmintos	Afluente	y c/4 Meses	C/2	C/Mes
Algas	Efluente		Meses	C/Mes

**Fuente:** OPS/OMS.

### 2.3.17 Tecnologías de tratamiento de aguas residuales domesticas para poblaciones pequeñas

Las pequeñas poblaciones por su propia localización geográfica y grado de desarrollo, presentan una problemática específica que dificulta la provisión de los servicios de depuración.

En esta problemática destacan:

- Los efluentes depurados deben cumplir normativas de vertido estrictas.
- El hecho de no poder aprovechar las ventajas que supone la economía de escala como consecuencia de su pequeño tamaño, lo que conduce a que los costes de implantación, mantenimiento por habitante sean elevados.
- La escasa capacidad técnica y económica para el mantenimiento de estaciones de tratamiento de aguas residuales.

Por todo ello, a la hora de seleccionar tecnología para el tratamiento de las aguas residuales generadas en los pequeños núcleos de población, debe darse prioridad a aquellas tecnologías que:

- Presenten un gasto energético mínimo, evitando, en lo posible, el empleo de dispositivos electromecánicos y recurriendo principalmente al uso de sistemas de oxigenación naturales.
- Requieran un mantenimiento simple.
- Simplifiquen la gestión de los lodos generados en los procesos de depuración.
- Presenten un bajo impacto ambiental sonoro y una buena integración en el medio ambiente.

Los tratamientos de aguas residuales por métodos naturales presentan como una opción tecnológica sostenible para pequeñas y medianas poblaciones dada su alta eficiencia, bajos costos de operación y mantenimiento.

Por consiguiente, una tecnológica más adecuada es aquella que optimiza la eficiencia técnica en la forma más simple y menos costosa, la tecnología debe hacer uso de los recursos humanos y materiales disponibles en el país. (FONAM, 2010)

Según Huallpa, Solano, Ordoñez, Gonzales, Aguilar y Robles (2010), los tratamientos por métodos naturales son aquellos, en los que la acción de la vegetación, el suelo y los microorganismos son los encargados de la depuración de aguas residuales. En los últimos años este tipo de tratamientos han recobrado gran interés debido a sus ventajas económicas, reducido consumo energético, baja producción de fangos, fácil operación y mantenimiento con respecto a los sistemas convencionales, y por tanto, se convierten en alternativas sostenibles para las pequeñas comunidades.

Dentro de los métodos naturales generalmente se diferencian dos grandes grupos: los métodos de aplicación sobre el terreno y los métodos acuáticos. Los métodos de aplicación en el terreno se caracterizan por la aplicación controlada de agua residual sobre la superficie de un terreno, para alcanzar un grado determinado de tratamiento a través de procesos físicos, químicos y biológicos.

Crites y Tchobanoglous (2000), por otra parte, dentro de los métodos acuáticos se incluyen aquéllos cuya acción principal de depuración se ejerce en el seno del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes y los microorganismos.

Los principales tipos de sistemas de tratamiento naturales para aguas residuales incluyen:

Métodos de aplicación en el terreno:

- Infiltración Rápida
- Infiltración Lenta
- Escorrentía Superficial

Métodos acuáticos:

- Humedales de flujo superficial
- Humedales de flujo subsuperficial

### **2.3.18 Métodos de aplicación en el terreno**

#### **a. Infiltración lenta**

El tratamiento mediante infiltración lenta, habitualmente designado por las siglas inglesas SR (slow rate), consiste básicamente en la aplicación de un caudal controlado de agua residual sobre una superficie de terreno con cubierta vegetal cultivada. (ver Figura 13). Habitualmente los sistemas SR se operan en ciclos de aplicación semanales, durante la temporada de crecimiento del cultivo.

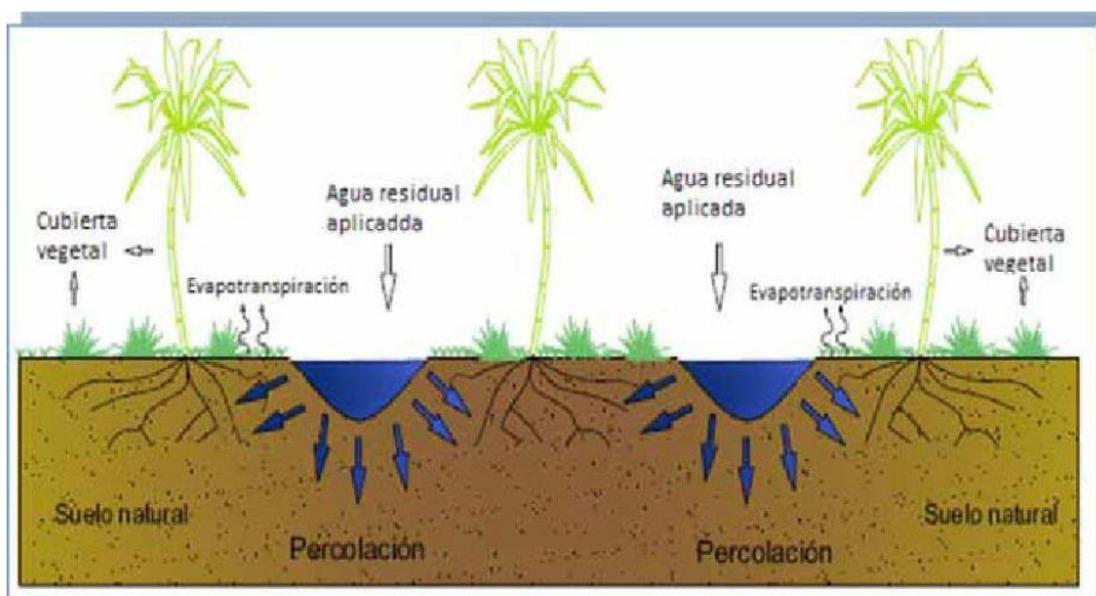
El agua residual se aplica mediante uso de aspersores, surcos y zanjas. Una vez aplicada el agua con previo tratamiento primario, está se infiltra por la superficie de terreno o percola vertical y horizontalmente en el terreno, además puede consumirse por evapotranspiración.

Los sistemas de SR se pueden clasificar como tipo I (infiltración lenta) o de tipo II (irrigación en cultivo), dependiendo de los objetivos del diseño. Cuando el objetivo

principal es el tratamiento de aguas residuales se clasifica como tipo I, y se trata la mayor cantidad de agua residual en la menor área de terreno posible. (Crites & Tchobanoglous, 2000). Los sistemas tipo II se diseñan con la finalidad de reutilizar el agua para la producción agrícola, y consisten en aplicar un caudal suficiente de agua residual cumpliendo con los requerimientos de irrigación de un cultivo.

Para la instalación de este sistema es primordial:

- Pendiente del 5 al 20%
- Nivel freático de 1 a 1.5 m
- Permeabilidad del suelo lenta o moderadamente rápida.
- Área de terreno necesaria para la tecnología: 8 - 20 m<sup>2</sup>/hab.



**Figura 13. Esquema de trayectoria hidráulica de aplicación para SR**

Fuente: Metcalf y Eddy (1998).

#### b. Infiltración rápida

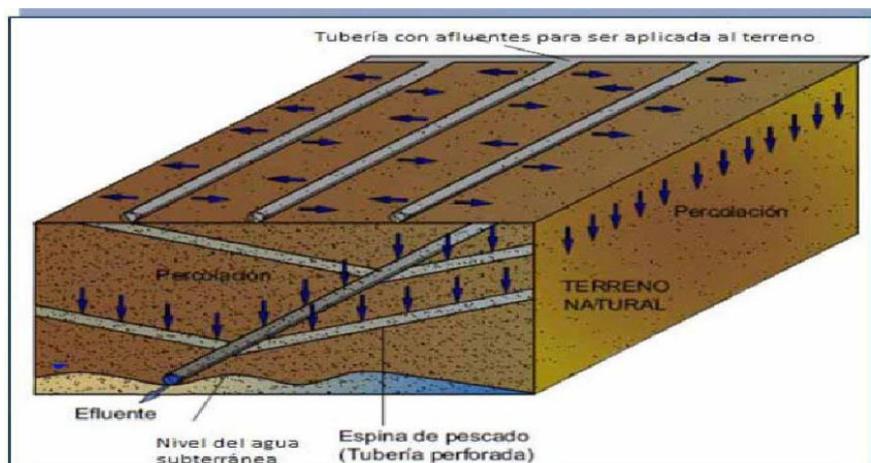
El tratamiento mediante infiltración rápida, conocido en la literatura inglesa como RI (rapid infiltration), se define como la aplicación controlada de agua residual sobre balsas superficiales construidas en suelos de permeabilidad media a alta (ver Figura 14).

Generalmente, la aplicación se realiza de forma cíclica, para permitir la regeneración aerobia de la zona de infiltración y mantener la máxima capacidad de tratamiento.

El agua residual requiere, al menos, tratamiento primario previo a la aplicación, siendo las cargas hidráulicas anuales normales de 6 a 100 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. No es necesario que las balsas de infiltración estén cultivadas, pero exigen mantenimiento periódico de la superficie. La evolución del efluente en el suelo y subsuelo es similar a la de los sistemas SR, No obstante, por tratarse caudales muy superiores, el suelo y formaciones infrayacentes han de tener mejores características hidráulicas.

Es un sistema de recarga y posible protección de los acuíferos, remoción de contaminantes, es fácil de operar y necesita menos área que otros métodos de aplicación sobre el suelo. Su principal limitación es el peligro de contaminación de las aguas subterráneas en caso de deficiente operación. Para evitarlo se necesita las siguientes características:

- Pendiente del 3 al 10% para evitar remociones excesivas de terreno
- Nivel freático a una profundidad mínima de 3m
- Permeabilidad del suelo rápida
- Área de terreno por habitante necesaria por la tecnología 2 a 20 m<sup>2</sup>/hab



**Figura 14. Esquema de trayectoria hidráulica de aplicación para IR**  
Fuente: Metcalf y Eddy (1998).

### c. Escorrentía superficial (ES)

El tratamiento mediante flujo superficial, OF (overland flow), es adecuado para zonas con suelos relativamente impermeables. Consiste en forzar la escorrentía del agua residual sobre un suelo previamente acondicionado (en pendiente y vegetación), para ser posteriormente recogida mediante diques artificiales (ver Figura 15). Las aplicaciones de agua residual suelen realizarse en ciclos de horas, durante 5 a 7 días a la semana, tras un escaso pretratamiento consistente en la separación de las fracciones sólidas de mayor tamaño. El grado de tratamiento alcanzable es equivalente a uno secundario, generalmente con buena reducción de nitrógeno y un peor rendimiento en fósforo.

La evaluación preliminar de las posibilidades de aplicación de los sistemas de tratamiento en el terreno requiere un conocimiento previo de los aspectos básicos de diseño, de su rendimiento y condiciones mínimas del emplazamiento.

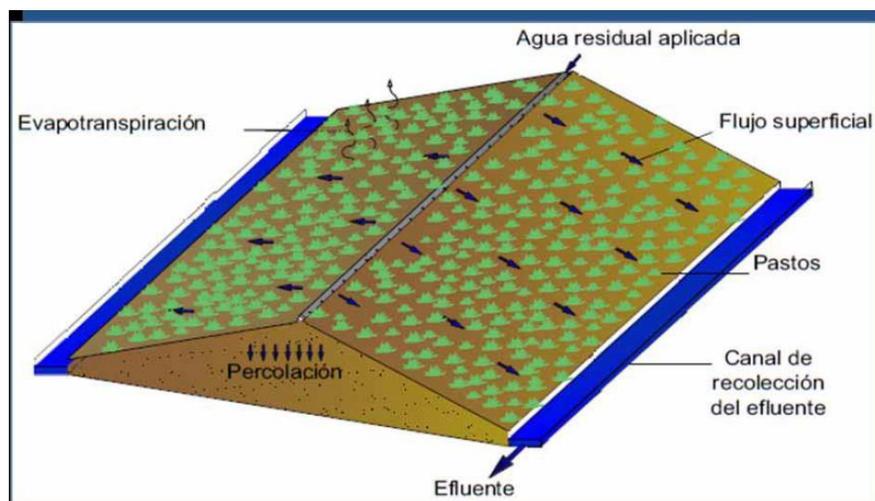
La escorrentía superficial es esencialmente un proceso biológico en el cual se aplica el agua residual sobre las zonas de un terreno donde fluye a través de la superficie vegetal, hasta unas zanjas de recolección. A medida que el agua fluye sobre el suelo, una porción se infiltra, otra se evapora y el resto fluye a los canales de recolección. La renovación del agua se lleva a cabo por medios físicos, químicos y biológicos. Huallpa, et al (2010).

Este sistema es viable, de costo bajo, eficiente para tratamiento de aguas residuales con materia orgánica degradable y sometidas a pre-tratamiento de cribado más sedimentación.

Para la instalación de este sistema es necesario:

- Pendientes del orden del 3 al 8%.
- Profundidad del nivel freático no crítica.

- Suelos con permeabilidad lenta tales como arcillas y limos arcillosos.
- Área requerida por la tecnología de 2,5 - 6 m<sup>2</sup>/hab.



**Figura 15. Esquema del sistema de escurrentía superficial**

Fuente: Metcalf y Eddy (1998).

### 2.3.19 Métodos acuáticos

En este grupo de métodos naturales de depuración de aguas residuales, se incluyen aquéllos cuya acción principal de depuración se ejerce en el seno del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes (especialmente sus raíces) y la actividad microbiológica asociada. Son sistemas que pueden funcionar estacionalmente o a lo largo de todo el año, dependiendo fundamentalmente del clima, y que con frecuencia se diseñan para mantener un flujo continuo. Los sistemas más empleados son:

#### a. humedales

Los humedales pueden ser naturales o artificiales y son sistemas de tratamiento natural por medios acuáticos en los cuales las plantas y animales son los principales medios que intervienen en el tratamiento de aguas residuales municipales, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo. Los humedales

artificiales son de superficie libre de agua (con espejo de agua), o de flujo subsuperficial (sin espejo de agua).

Los humedales tienen dos funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

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 los 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. Delgadillo, Camacho, Perez, y Andrade (2010).

El uso de humedales artificiales requiere procesos previos de tratamiento que garanticen una efectiva remoción de los sólidos suspendidos, con el fin de evitar la obstrucción del lecho filtrante. Estos procesos preliminares pueden consistir en la implementación de unidades de sedimentación, como un tanque Imhoff, o un tanque séptico.

Por otro lado, cabe mencionar, este tipo de tratamiento es necesario la impermeabilización a través de recubrimiento con material arcilla o geomembrana.

#### **b) Clasificación de humedales:**

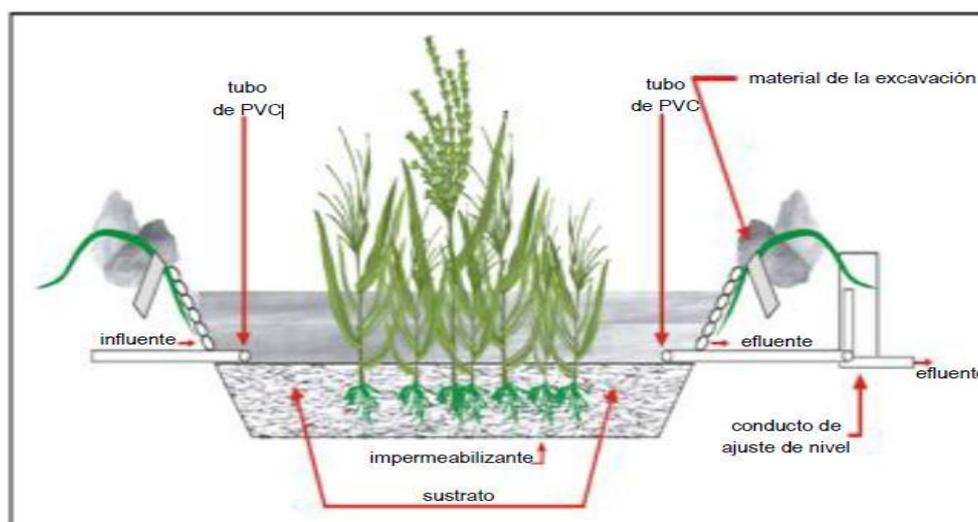
Existen dos tipos de humedales construidos, dependiendo de la situación del nivel de agua: el denominado de superficie libre de agua, en el que el agua está en contacto con la atmósfera y constituye la fuente principal del oxígeno para aireación; y el denominado de flujo subsuperficial, donde la superficie del agua se mantiene a nivel

de la superficie del lecho permeable o por debajo de la misma. La transferencia de oxígeno desde las hojas hasta las raíces de las plantas, actúa como mecanismo suministrador de oxígeno al agua. La presencia de plantas emergentes con raíces es esencial en ambos tipos de sistemas. La carga hidráulica anual aplicada varía en el rango de 3 a 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, dependiendo del tipo de sistema, características del agua de alimentación, límites impuestos al efluente, etc.

#### - Humedales de flujo libre o superficial (HFL)

Según Romero (2001) los HFL con espejo de agua son balsas, una ciénaga, pantano o canales paralelos con la superficie del agua expuesta a la atmósfera (Figura 16). Para la instalación de este sistema es necesario:

- Suelos arcillosos de baja permeabilidad.
- Vegetación inundada hasta una profundidad de 10 a 60 cm.
- La vegetación puede ser cañas o juncos.
- Pendiente del terreno < 5 %
- La profundidad del nivel freático no es un limitante.
- Área requerida por el tratamiento: 2,5 a 9 m<sup>2</sup>/hab.



**Figura 16. Humedal artificial de flujo libre superficial**

Fuente: Haro y Aponte (2010).

### - Humedales de flujo subsuperficial (HFS).

De acuerdo a Romero (2001) los HFS son métodos acuáticos en el que el agua fluye por debajo de la superficie de un medio poroso de grava gruesa o arena sembrado de plantas emergentes.

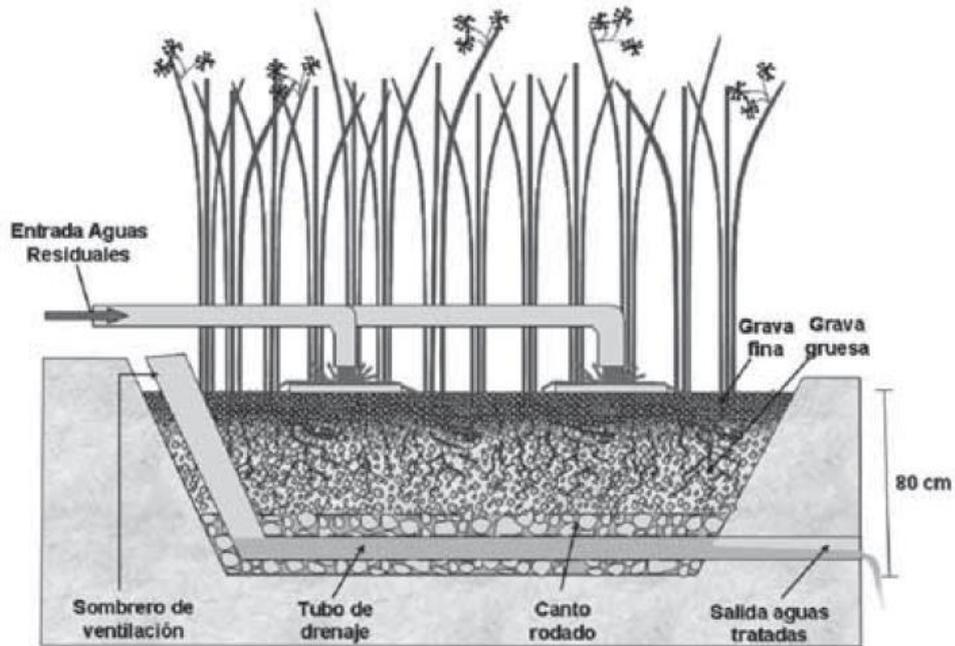
Para la instalación de este sistema es necesario:

- Suelos arcillosos relativamente impermeable
- La profundidad del lecho va desde 0.5 a 0.9 m
- Pendiente del terreno < 5%.
- La profundidad del nivel freático no es un limitante.
- Área requerida por el tratamiento: 1,5 - 7 m<sup>2</sup>/hab.

Este tipo de tratamiento tiene la ventaja de evitar posibles problemas de mosquitos y generación de malos olores, ya que el nivel del agua está por debajo de la superficie. Como desventaja, sin embargo, presentan mayores costos por el medio de depuración (grava) y riesgo de taponamiento.

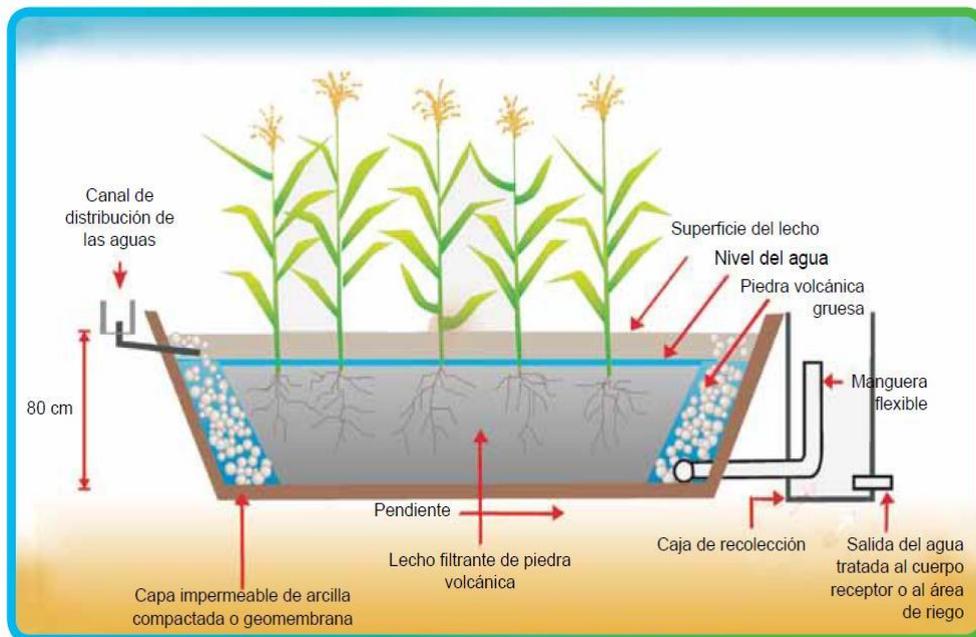
Existen dos tipos de humedales de HFS, los artificiales de flujo vertical (HAFV) y los de flujo horizontal (HAFH):

**Humedal artificial de flujo vertical (HAFV).** Se caracterizan por disponer de un sistema intermitente de alimentación por encima de la superficie distribuido a lo largo y ancho del lecho, el agua se infiltra por gravedad a través del medio de soporte (grava, arena) permitiendo que el influente alimentado tenga una mayor dilución de oxígeno atmosférico y así se cuente con condiciones aerobias de degradación para que el nitrógeno amoniacal se convierta en nitratos (ver Figura 17). Los HAFV tienen una alta eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos; sin embargo, es menor en la transformación de compuestos de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) y aún menor el tratamiento de metales pesados (Haro y Aponte, 2010).



**Figura 17. Esquema de un humedal subsuperficial de flujo vertical**  
Fuente: Delgadillo, Camacho, Perez, y Andrade (2010).

**Humedal artificial de flujo horizontal (HAFH).** El influente se alimenta horizontalmente a través de todo lo ancho del humedal y fluye por gravedad (debido a la inclinación de la base) entrando en contacto con el medio de soporte, rizomas y microorganismos (ver Figura18).



**Figura 18. Esquema de un humedal artificial de flujo horizontal**  
Fuente: Tratamiento y reuso de aguas residuales – parte 2

La intermitencia y la inundabilidad permanente confieren propiedades diferentes a los sistemas verticales y horizontales respectivamente; en particular afecta la transferencia de oxígeno. Los sistemas con flujo horizontal se han diseñado generalmente con profundidades de 0.6m, producen efluentes con ausencia de oxígeno, y presentan la posibilidad de malos olores; los sistemas con flujo vertical operan con cargas superiores que los horizontales, producen efluentes más oxigenados y libres de malos olores. Haro y Aponte (2010).

### c) Mecanismos de remoción de contaminantes

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual (ver Tabla 17). Evidentemente, un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos tiene lugar. Por lo tanto, la influencia e interacción de cada componente involucrado es bastante compleja.

**Tabla 17:**

#### **Mecanismos de remoción de los contaminantes en los humedales**

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>MECANISMOS DE REMOCIÓN</b>
Sólidos suspendidos	Sedimentación, floculación, filtración
Materia orgánica biodegradable	Degradación microbiana (aerobia, anaerobia y facultativa) Sedimentación (acumulación de material orgánico/lodo en la superficie del sedimento)
Nitrógeno	Amonificación seguida por la nitrificación-denitrificación bacteriana; volatilización del amonio y rizofiltración.
Fósforo	Reacciones de adsorción, precipitación con el aluminio, hierro y calcio y minerales de la arcilla en el suelo.

...Continuación

CONTAMINANTE	MECANISMOS DE REMOCIÓN
Metales pesados	Sedimentación. Adsorción sobre la superficie de la planta y los detritus.
Patógenos	Sedimentación/filtración. Declinación Radiación ultravioleta. Excreción de antibióticos por las raíces de las plantas.

**Fuente:** Haro y Aponte (2010).

A continuación, se explican los mecanismos de remoción de contaminantes que ocurren en los humedales construidos.

#### - Remoción de sólidos suspendidos

Los mecanismos que intervienen en la eliminación de la materia en suspensión en los Humedales Artificiales son:

- Sedimentación: la materia en suspensión sedimentable (principalmente de naturaleza orgánica), presente en las aguas a tratar, decanta exclusivamente por la acción de la gravedad.
- Floculación: permite la sedimentación de partículas de pequeño tamaño, o de menor densidad que el agua, al producirse agregados de las mismas que ya si cuentan con capacidad para decantar.
- Filtración: la retención de la materia en suspensión tiene lugar al pasar las aguas a través del conjunto que forman el sustrato y los rizomas, raíces y tallos de la vegetación.

En el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial, la eliminación de la materia en suspensión se debe, principalmente, a fenómenos de sedimentación y de

filtración de las aguas a su paso por toda la masa de tallos y de los restos de vegetación caídos al agua. En este tipo de humedales, para conseguir elevados rendimientos de sólidos en suspensión, se requiere disponer de zonas de vegetación abundante, que faciliten la sedimentación (al disminuir la velocidad de paso de las aguas) y la filtración, a la vez que, por el efecto sombra, se evita el crecimiento excesivo de microalgas, que como en el caso de los Lagunajes podría incrementar los contenidos en materia en suspensión de los efluentes finales.

En los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial, la eliminación de la materia suspensión tiene lugar, principalmente, por fenómenos de filtración a través del conjunto que forman el sustrato (sobre el que crecen las plantas), los rizomas y las raíces. Teniendo lugar el mayor porcentaje de eliminación de partículas en suspensión en la zona de entrada a los humedales (Delgadillo, Camacho, Perez, & Andrade, 2010).

Esta retención de la materia en suspensión se da por tres motivos: la baja velocidad del agua, las fuerzas de adhesión entre partículas y las constricciones del flujo producidas tanto por el medio granular como por el entramado de raíces y rizomas. Son por tanto un conjunto de mecanismos físicos los que contribuyen a la eliminación de los sólidos en suspensión. De acuerdo a Delgadillo et al. (2010) algunos estudios han demostrado que hay una acumulación neta de sólidos recalcitrantes a largo plazo. Esto supone, que incluso bien diseñados, no se puede predecir la vida útil media de este tipo de instalaciones.

Los Humedales de Flujo Subsuperficial bien diseñados son muy eficientes para eliminar sólidos en suspensión (Delgadillo et al., 2010). Los valores habituales de eliminación se encuentran en el intervalo 85-95%.

Los sólidos de naturaleza orgánica retenidos en el sustrato experimentan reacciones de biodegradación, que se aceleran en los momentos del año de temperaturas

más elevadas. Esta degradación supone una fuente interna de materia orgánica disuelta, lo que podría explicar el por qué los Humedales de Flujo Subsuperficial no presentan en época veraniega rendimientos más elevados de eliminación de materia orgánica que los que se logran en el periodo invernal.

Para evitar la rápida colmatación de los sustratos filtrantes se hace imprescindible la existencia previa de un Pretratamiento y de un Tratamiento Primario, que eliminen un elevado porcentaje de la materia en suspensión presente en las aguas residuales a tratar.

En la actualidad, se comienza a trabajar combinando Filtros de Turba y Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial, prescindiendo del Tratamiento Primario mediante fosas sépticas o tanques Imhoff.

#### **– Remoción de materia orgánica**

La materia orgánica, presente en forma de materia en suspensión sedimentable, irá decantando paulatinamente en los humedales y experimentará procesos de degradación biológica. Igualmente, parte de la materia orgánica presente en forma particulada quedará retenida por filtración, al pasar las aguas por el entramado sustrato filtrante-raíces-tallos.

La eliminación de materia orgánica por las dos vías descritas transcurre de forma rápida, y en el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial casi la mitad de la  $DBO_5$  se elimina al pasar las aguas por los primeros metros del humedal.

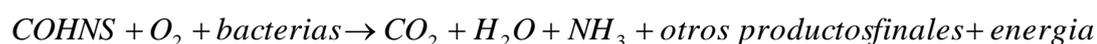
Sobre la materia orgánica disuelta, al igual que sobre la particulada, actúan los microorganismos presentes en el humedal, principalmente bacterias, que utilizarán esta materia orgánica a modo de sustrato.

De cualquier manera los procesos físicos, químicos y microbiológicos responsables de la eliminación de la materia orgánica pueden variar en el tiempo y en el

espacio, y además, dependen de muchos factores tales como la carga orgánica, la profundidad del agua y la disponibilidad de aceptores de electrones (Delgadillo et al., 2010).

En las distintas modalidades de Humedales Artificiales se dan zonas con presencia o ausencia de oxígeno molecular, por lo que la acción de las bacterias sobre la materia orgánica tiene lugar tanto a través de procesos biológicos aerobios como anaerobios. En el caso de los procesos de degradación aerobios, una fracción de la materia orgánica es oxidada por la flora bacteriana, que obtiene de esta forma la energía necesaria para su mantenimiento celular.

#### Oxidación



Donde COHNS representa los elementos predominantes en la materia orgánica presente en las aguas residuales. De forma simultánea, otra fracción de materia orgánica se convierte en nuevo tejido celular (síntesis), empleándose para ello la energía liberada en la fase de oxidación.

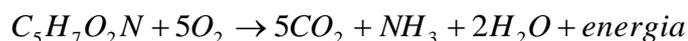
#### Síntesis



Donde  $C_5H_7O_2N$  representa la composición media de los microorganismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica.

Finalmente, una vez que disminuye la materia orgánica disponible, las nuevas bacterias comienzan a consumir su propio tejido celular, con el fin de obtener energía para su mantenimiento. Este tercer proceso se conoce como respiración endógena que viene dada por la siguiente representación:

## Respiración endógena



El aporte de oxígeno para el mantenimiento de las reacciones de oxidación, síntesis y respiración endógena, transcurre de forma diferente en función de la modalidad de Humedal Artificial de que se trate.

La vegetación propia de los Humedales Artificiales (plantas acuáticas emergentes), también contribuyen a la oxigenación, suministrando a través de sus raíces y rizomas parte del oxígeno que es producido por fotosíntesis en las hojas, y que es transportado a lo largo de un canal hueco conocido como aerénquima. Aunque sin bien es cierto que las plantas presentan esta capacidad de transportar oxígeno, la mayor parte del mismo lo utilizan para consumo propio (Pidre, 2010).

Existen notables discrepancias en lo referente a las tasas de transferencia oxígeno de los macrófitos, oscilando entre los 0,5-0,6 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.d y los 20 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.d. Durante las décadas de los 80 y 90 hubo una gran controversia sobre el papel que tenían las plantas en el tratamiento, pero ahora está ampliamente aceptado por la comunidad científica que las plantas sólo tienen influencia notable si se trata de instalaciones que trabajan con baja carga (Pidre, 2010).

En el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal, la presencia de oxígeno es mucho menor, debido a que el medio se encuentra saturado por agua, que desplaza a los gases atmosféricos de los poros, dando lugar a un sustrato anóxico.

En las zonas de los humedales carentes de oxígeno molecular, la degradación de la materia orgánica transcurre vía anaerobia, a lo largo de una serie de etapas concatenadas, en las que los compuestos resultantes de cada etapa sirven como sustrato a la siguiente.

Las etapas de la degradación anaerobia son las siguientes:

- Etapa hidrolítica: los compuestos orgánicos complejos (hidratos de carbono, proteínas, lípidos), son transformados en otros más sencillos (monosacáridos, aminoácidos, ácidos grasos, glicerol), que sirven de sustrato a las bacterias de la siguiente etapa. En esta primera etapa también se produce la solubilización de parte la materia orgánica particulada.
- Etapa acidogénica: los compuestos orgánicos sencillos, generados en la etapa anterior, son transformados en ácidos orgánicos volátiles (acético, propiónico y butírico, fundamentalmente), mediante el concurso de bacterias generadoras de ácidos (acidogénicas, acetogénicas). La capacidad tampón del medio permite mantener los valores de pH próximos a la neutralidad. Dado que los productos que se forman en esta etapa se encuentran muy poco estabilizados con relación a los iniciales, los rendimientos de eliminación de materia orgánica que se alcanzan, expresados como DBO<sub>5</sub> o DQO, son muy bajos.
- Etapa metanogénica: los ácidos orgánicos volátiles, liberados en la etapa acidogénica, son transformados mediante el concurso de bacterias metanogénicas, en biogás, mezcla, principalmente, de metano y anhídrido carbónico.

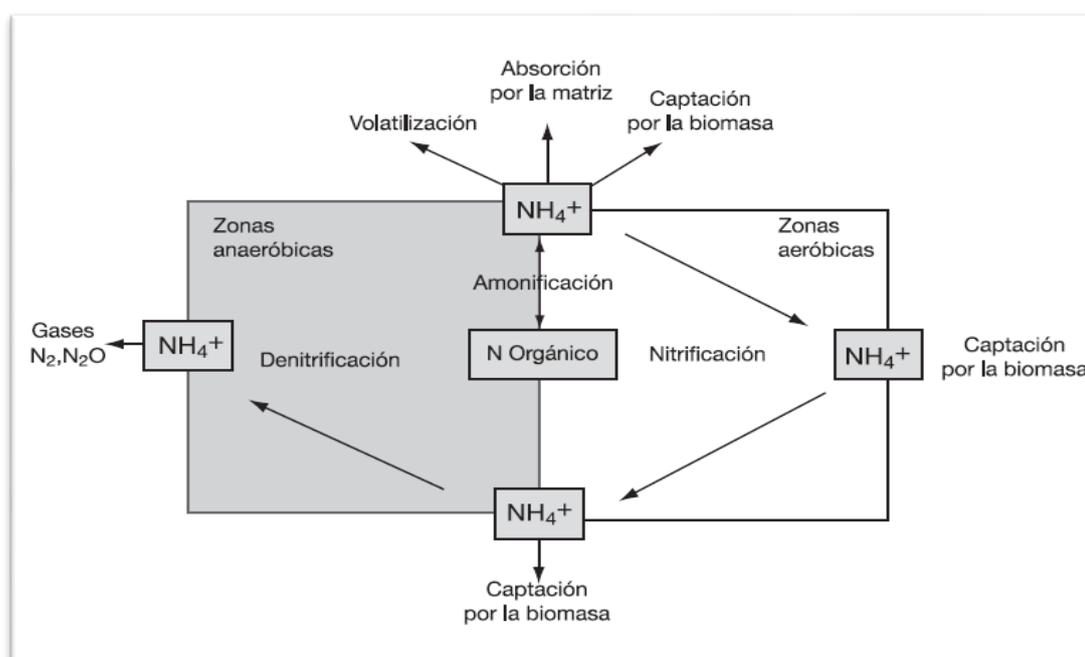
En esta fase es en la que tiene lugar realmente la reducción del contenido en materia orgánica, al transformarse ésta en biogás, que abandona el sistema.

Esta última etapa es la limitante del proceso global de degradación anaerobia, como consecuencia de que las bacterias metanogénicas (anaerobias estrictas), son las que presentan un metabolismo más lento y son las más sensibles a las condiciones ambientales presentes (pH, temperatura, presencia de tóxicos, etc.).

Se asume, que en los Humedales Artificiales los compuestos orgánicos son degradados de forma simultánea mediante procesos aerobios y anaerobios, siendo difícil cuantificar la proporción en que se producen cada uno de ellos. En unos estudios realizados sobre Humedales de Flujo Horizontal de 30 y 50 cm de profundidad (Delgadillo et al. 2010), concluyeron que en los humedales poco profundos la principal vía de degradación es la desnitrificación, seguida de la sulfatoreducción. En cambio, en los humedales profundos predomina mayoritariamente la sulfatoreducción.

### - 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 desnitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato. Todo el proceso puede ser dividido en pasos, iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y desnitrificación.



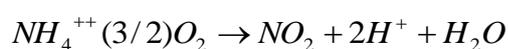
**Figura 19. Diagrama del metabolismo del nitrógeno**

Fuente: Delgadillo, Camacho, Perez y Andrade (2010).

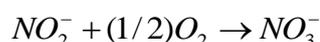
La amonificación ocurre en las zonas aeróbicas, como también en zonas anaeróbicas, por la mineralización del nitrógeno contenido en los orgánicos (figura 19).

La nitrificación requiere la presencia de oxígeno disuelto (condiciones aeróbicas), amonio o nitrito como fuente de energía y dióxido de carbono como fuente de carbono. La oxidación en sí ocurre en dos estadios, cada uno involucra diferentes especies de bacterias nitrificantes quimioautótrofas.

El primer paso es la oxidación de iones amonio a nitrito (nitrosificación).



En este paso, la liberación de iones de hidrógeno baja el pH, por lo que es necesario un medio fuertemente alcalino para mantener un pH en el rango de 7.5 a 8.6 (Delgadillo et al., 2010). El género bacterial que es considerado para catalizar esta reacción es Nitrosomas, en cambio el género Nitrobacter es responsable para la transformación de nitrito a nitrato.



Toda la reacción necesita un alto ingreso de oxígeno: alrededor de 4.5 kg por cada kg de amonio-nitrógeno ( $NH_4^+$ -N) oxidado. Las bacterias son sensibles a un amplio rango de inhibidores; así, altas concentraciones de nitrógeno amoniacal son inhibidoras. También concentraciones de oxígeno disuelto por más de 1 mg  $O_2/l$  son requeridos y temperaturas por debajo de 100 °C reducen el desempeño significativamente.

La denitrificación es el paso final en la remoción de nitrógeno. Ocurre bajo condiciones anóxicas, esto significa, que no hay oxígeno disuelto presente (o con una concentración < a 2% de saturación) pero donde el oxígeno está disponible en fuentes tales como el nitrato, nitrito o incluso sulfato.

Un amplio rango de bacterias anaeróbicas facultativas, siendo las más comunes *Pseudomonas sp.*, *Achromobacter sp.* y *Aerobacter sp.*, realizan el proceso. Toda la reacción que incluye como primer paso la conversión de nitrato a nitrito, seguida por la producción de óxido nítrico y gas nitrógeno, puede ser resumida como sigue:



Los tres productos son gaseosos, pero mayormente el gas nitrógeno es perdido en la atmósfera debido a que los primeros dos productos son pasajeros en la mayoría de los casos.

Similar al proceso de nitrificación, la denitrificación es también fuertemente dependiente de la temperatura y es necesario suficiente carbono como fuente de energía para que la bacteria realice la conversión.

#### - **Remoción de fósforo**

En las aguas residuales urbanas el fósforo se encuentra tanto en forma orgánica, como en forma de ortofosfato inorgánico o de fosfatos complejos. Estos últimos, en el transcurso de los tratamientos biológicos se hidrolizan dando lugar a ortofosfatos, incorporándose entre el 10-20% de los mismos a la biomasa bacteriana.

Las principales vías para la eliminación del fósforo en los Humedales Artificiales son:

- Absorción directa por parte de las plantas.
- Adsorción sobre partículas de arcilla, partículas orgánicas y compuestos de hierro y aluminio.

- Precipitación, mediante reacciones del fósforo con el hierro, aluminio y calcio presentes en las aguas, dando lugar a la formación de fosfatos insolubles.

La absorción del fósforo por las plantas se da en mucha menor cuantía que en el caso del nitrógeno (esta absorción es del orden de un 10%), siendo los fenómenos fisicoquímicos los que juegan el papel principal en la reducción de este nutriente

El fósforo fijado-precipitado puede liberarse durante determinadas épocas del año en función de las condiciones ambientales y, fundamentalmente, como respuesta a cambios en el potencial de óxido-reducción.

En general, en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial la eliminación de fósforo no es muy significativa situándose entre el 15-30%. Puede incrementarse este porcentaje de reducción de fósforo mediante el empleo de sustratos filtrantes específicos (p.e. con contenidos en hierro), que potencien la retención del mismo.

Se ha observado, que en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial inicialmente se retiene una mayor cantidad de fósforo, como consecuencia de que en esta etapa el sustrato presenta una mayor cantidad de zonas disponibles para su adsorción, disminuyendo paulatinamente esta capacidad de retención con el tiempo.

#### - **Remoción de metales pesados**

La eliminación de metales (cadmio, cinc, cobre, cromo, mercurio, selenio, plomo, etc.), en los Humedales Artificiales, tiene lugar a través de diferentes vías:

- Procesos de adsorción.
- Precipitación química.
- Sedimentación.
- Asimilación por parte de las plantas.

Los metales retenidos pueden volver a liberarse en determinadas épocas del año, en función de las variaciones del potencial de óxido-reducción que tienen lugar dentro del sistema.

#### - **Remoción de patógenos**

La eliminación de microorganismos es un proceso de gran complejidad ya que depende de factores como la filtración, la adsorción y la depredación (Pidre, 2010). Se ha observado que tanto en sistemas verticales como horizontales la eliminación es dependiente del tiempo de permanencia y del medio granular.

#### **Coliformes fecales**

En general, la mayoría de los estudios realizados en Humedales Artificiales muestran como la eliminación de bacterias coliformes fecales puede alcanzar valores entre 1 y 2,5 unidades logarítmica, mientras que en los colifagos pueden alcanzar entre 0,5 y 2 unidades logarítmicas (Pidre, 2010).

En los Humedales Artificiales la eliminación de coliformes fecales se ajusta a modelos e cinética de primer orden, lográndose la mayor parte del abatimiento de los patógenos en los primeros tramos de los humedales, de forma que hacia la mitad de los mismos ya se ha eliminado del orden del 80% de los mismos.

Los organismos patógenos presentes se eliminan por diferentes mecanismos, destacando:

- La adsorción de los patógenos sobre las partículas del sustrato filtrante.
- La toxicidad que sobre los organismos patógenos ejercen los antibióticos producidos por las raíces de las plantas.
- La acción depredadora de bacteriófagos y protozoos.

### **Huevo de helmintos**

Los huevos de helmintos son eliminados en los humedales construidos mediante filtración a través del sustrato y la adhesión con las raíces. En 1999, Stott y sus colaboradores determinaron que para la eliminación del 100 % de los huevos de helmintos era necesaria la utilización de humedales de flujo subsuperficial donde el proceso de eliminación se producía en el primer cuarto de la superficie del humedal. (Delgadillo et al., 2010).

#### **d) 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 (Delgadillo et al., 2010).

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. Además, 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, aunque las estimaciones sobre la cantidad de esta transferencia de oxígeno varían en un amplio rango.

El consumo de nutrientes por la planta no juega un rol importante y solamente tiene que ser considerado en el caso de cosecha del tejido de la planta. Otro hecho importante, especialmente en climas templados, es la capacidad de aislamiento térmico de las macrófitas.

En invierno, la capa de tejido muerto que cubre la superficie protege del frío y por lo tanto de las disminuciones de temperatura del agua residual.

Por último, las macrófitas pueden proveer hábitat para la vida salvaje y dar una apariencia agradable a los sistemas de tratamiento de aguas residuales, según la especie escogida.

### 2.3.20 Diseño de humedales

Antes de iniciar la construcción de un humedal es fundamental tomar en cuenta los siguientes factores de diseño:

- **Caudal de entrada.** Es el volumen de agua que pasa por una determinada sección transversal en una unidad de tiempo.
- **Características del líquido.** Se refiere a los contaminantes (físicos, químicos y biológicos) que se encuentran en el agua residual, por ejemplo: color, temperatura, sólidos en suspensión, sólidos disueltos, bacterias, protozoos, virus, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y metales pesados.
- **Selección de la vegetación.** Primeramente, se deben considerar las condiciones ambientales, el tipo de vegetación que existe en la zona, los objetivos del tratamiento y la calidad, inicial y final, de dichas aguas.
- **Dimensión del humedal.** Depende del flujo a tratar y las características que debe cumplir el efluente. La superficie necesaria se puede expresar en l/día·m<sup>2</sup>.
- **Características del suelo.** El tipo de suelo que deberá tener un humedal depende del tipo de flujo. Si es de flujo libre se deposita tierra y si es de flujo subterráneo se debe buscar que la permeabilidad del suelo sea baja y no haya percolación. En todos los casos la compactación de arcilla suele ser suficiente para preparar los canales.

- **Energía.** Este factor es determinante ya que la energía luminosa que reciben los vegetales es fundamental para su crecimiento y ciclo biogeoquímico; es importante tomar en cuenta la latitud del lugar, dado que el sol es la fuente de energía empleada.
- **Evapotranspiración.** Se refiere a la pérdida de humedad por evaporación directa y por la transpiración de la vegetación.

Las variables de diseño del humedal son: el área, la relación largo-ancho, la profundidad y el gasto promedio; las cuales se calculan a partir de las siguientes relaciones:

**Área.** Los humedales artificiales son reactores biológicos cuyo rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo pistón (ec. 2.3), a partir de la cual se calcula el área del humedal.

Ecuación básica de los reactores de flujo pistón:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_r t} \dots\dots\dots 2.2$$

Para resolver la ecuación 2.3 primero se debe obtener el tiempo de retención hidráulica (t), el cual es el tiempo aproximado en el que el agua residual estará en el humedal desde su entrada hasta su salida y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{(L)(W)(d)(n)}{Q} \dots\dots\dots 2.3$$

Finalmente, para obtener el área del humedal se deberán combinar las ecuaciones 2.3 y 2.4:

$$A = LW = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{k_T \cdot yn} \dots\dots\dots 2.4$$

**Tiempo de retención hidráulica.** Es el tiempo en el que el agua residual pasa a través del sistema. Para el diseño de humedales se ha encontrado que 5 días es el tiempo que garantiza la remoción de contaminantes en un 80% (Haro y Aponte, 2010).

**Relación largo-ancho.** La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. Las relaciones largo-ancho de 10:1 o mayores asegurarían un flujo a pistón, pero tienen el inconveniente de que el agua se desborde en la parte alta debido al incremento en la resistencia del flujo, esto causado por la acumulación de residuos de vegetación. Por lo tanto, relaciones de 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables (Haro y Aponte, 2010).

**Profundidad.** Para este parámetro se recomiendan profundidades de 0.30 a 0.60m para sistemas de flujo libre superficial, teniendo en cuenta que si hay una pendiente en la zona más profunda debe haber 0.60m y en la menos profunda 0.30m. En ciertos casos, sobre todo en humedales pequeños, estas dimensiones pueden reducirse a 0.50m e incluso a 0.20m. Para sistemas de flujo subterráneo se recomiendan profundidades de 0.1 a 0.45m.

**Gasto [Q].** Es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de una población en un día de consumo promedio (Haro y Aponte, 2010).

El gasto se determina aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\text{Dotacion}(l / \text{hab.dia}) * \text{poblacion}(\text{hab}) * C * A}{86400(s / \text{hab})} \dots\dots\dots 2.5$$

Con base en los factores descritos se puede señalar que en el diseño del humedal primeramente se deberá considerar el flujo, el cual debe superar la resistencia por fricción mismo sistema; esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos en los humedales de flujo libre y en los de flujo subterráneo por las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los humedales. La energía necesaria para superar esta resistencia se da por la pérdida de carga (pérdida de energía dinámica del fluido debido a la fricción de las partículas entre sí y contra las paredes de la tubería o canal que las contiene) entre la entrada y salida del flujo en el sistema.

### 2.3.21 Construcción de humedales

Existen varios aspectos de importancia que deben considerarse al momento de construir un humedal, éstos son la excavación, la nivelación, la impermeabilización de la capa subterránea del terreno, la selección y colocación del material granular, la vegetación y las estructuras de entrada y salida (Haro y Aponte, 2010), mismos que consisten en:

**Excavación.** Excavar a la profundidad que corresponde (0.40-0.60m) la cubierta vegetal, cuyo material puede ser reservado y reutilizado posteriormente como medio de soporte o para otras actividades en la obra.

**Nivelación.** Establecer un fondo con una ligera pendiente (1%) para asegurar el drenaje y una salida de altura variable con el nivel del agua (Haro y Aponte, 2010). Lo anterior, con la finalidad de que existan las condiciones hidráulicas adecuadas para el flujo del sistema.

**Impermeabilización.** Contar con una barrera impermeable para evitar la contaminación del subsuelo, algunas veces esta barrera se presenta de forma natural por una capa de arcilla o por el material del sitio, mismos que si se compactan llegan a un estado

cercano al impermeable. Otras alternativas pueden ser el uso de asfalto o de geomembranas.

**Sustrato.** Colocar grava, arcilla, tezontle o material de la excavación sobre el suelo impermeabilizado hasta una altura de 0.20m, de tal forma que sirva como base para las raíces de la vegetación.

**Vegetación.** Trasplantar rizomas al lecho previamente preparado, ya que el sembrado de semillas es un método que requiere mucho tiempo y control estricto del agua. Las plantas que se utilizan normalmente miden de 0.20 a 0.40m de alto, mismas que se plantan uniformemente por todo el humedal a una distancia aproximada de 0.60m entre cada una; se espera que después de algún tiempo (6 meses a un año) existan plantas en todo el humedal sin que queden espacios libres entre ellas.

### 2.3.22 Criterios de selección de los sistemas de tratamientos naturales

Huallpa et al. (2010), mencionan que la selección de un tratamiento de aguas residuales, depende de criterios que sirven para realizar un análisis comparativo entre las diferentes alternativas, a fin de llegar a la elección de la más conveniente para una localidad, dependiendo de sus características particulares. Para ello debe estudiarse el afluente a ser depurado, el nivel de calidad que se desea en el agua tratada de acuerdo al objetivo del tratamiento, las características de terreno, factores ambientales, costos construcción, operación y mantenimiento.

En este apartado como resultado de la investigación, se presenta un estudio comparativo entre las diferentes alternativas de tratamientos naturales de aguas residuales domésticas para comunidades menores a 5000 habitantes, en base a ocho criterios de selección que se presentan en la tabla 18, con la información requerida en cada uno de ellos.

**Tabla 18:****Criterios de selección de sistemas de tratamiento naturales**

<b>CRITERIOS DE SELECCIÓN</b>	<b>VARIABLES</b>
Factores Demográficos	Población (rangos para calificación)
	Existencia y tipo de Alcantarillado
	Existencia de Agua Potable
Características del terreno	Superficie necesaria
	Profundidad del nivel freático
	Pendiente
	Topografía
Objetivos de Tratamiento	Expectativas de calidad del efluente
	Nivel de Tratamiento
Características del Agua residual	Origen
	Composición
	Caudal
	Temperatura
Características del Suelo	Tipo
	Textura
	Velocidad de infiltración
	Permeabilidad
Características climatológicas	Precipitación
	Temperatura
	Evapotranspiración
Aspectos Tecnológicos	Viento
	Impacto Ambiental (aire, suelo, agua, salud)
	Eficiencia del tratamiento
	Facilidad de operación y Mantenimiento
Costes	Operación y Mantenimiento
	Construcción

Fuente: Huallpa et.al (2010). Guía para la selección de tecnologías de depuración de aguas residuales por métodos naturales. Universidad Técnica Particular de Loja.

**Tabla 19:**

**Matriz de selección final de sistemas de tratamiento naturales**

<b>Matriz: Selección final del tratamiento</b>						
<b>CRITERIOS</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>TECNOLOGÍA</b>				
		<b>IR</b>	<b>IL</b>	<b>ES</b>	<b>HF L</b>	<b>HSS</b>
<b>Cobertura de Agua potable</b>	Tiene servicio					
	No tiene Servicio					
	Cobertura Parcial					
<b>Existencia y tipo de alcantarillado</b>	Alcantarillado separado					
	Alcantarillado Mixto					
	Alcantarillado Combinado					
<b>Población</b>	Población					
<b>Características del terreno</b>	Superficie necesaria (m2/hab)					
	Prof. del nivel freático (m)					
	Pendiente de terreno (%)					
	Relieve (Adimensional)					
<b>Características del agua residual</b>	Origen (Adimensional)					
	Caudal (l/s)					
	Temperatura de agua residual (°C)					
<b>Características del suelo</b>	Tipo de suelo (Adimensional)					
	Textura (Adimensional)					
	Velocidad de infiltración (mm/h)					
	Permeabilidad (Adimensional)					
<b>Características climáticas</b>	Temperatura (°C)					
	Evapotranspiración (mm/mes)					
	Vientos (m/s)					
	Precipitación (mm/mes)					

... Continuación

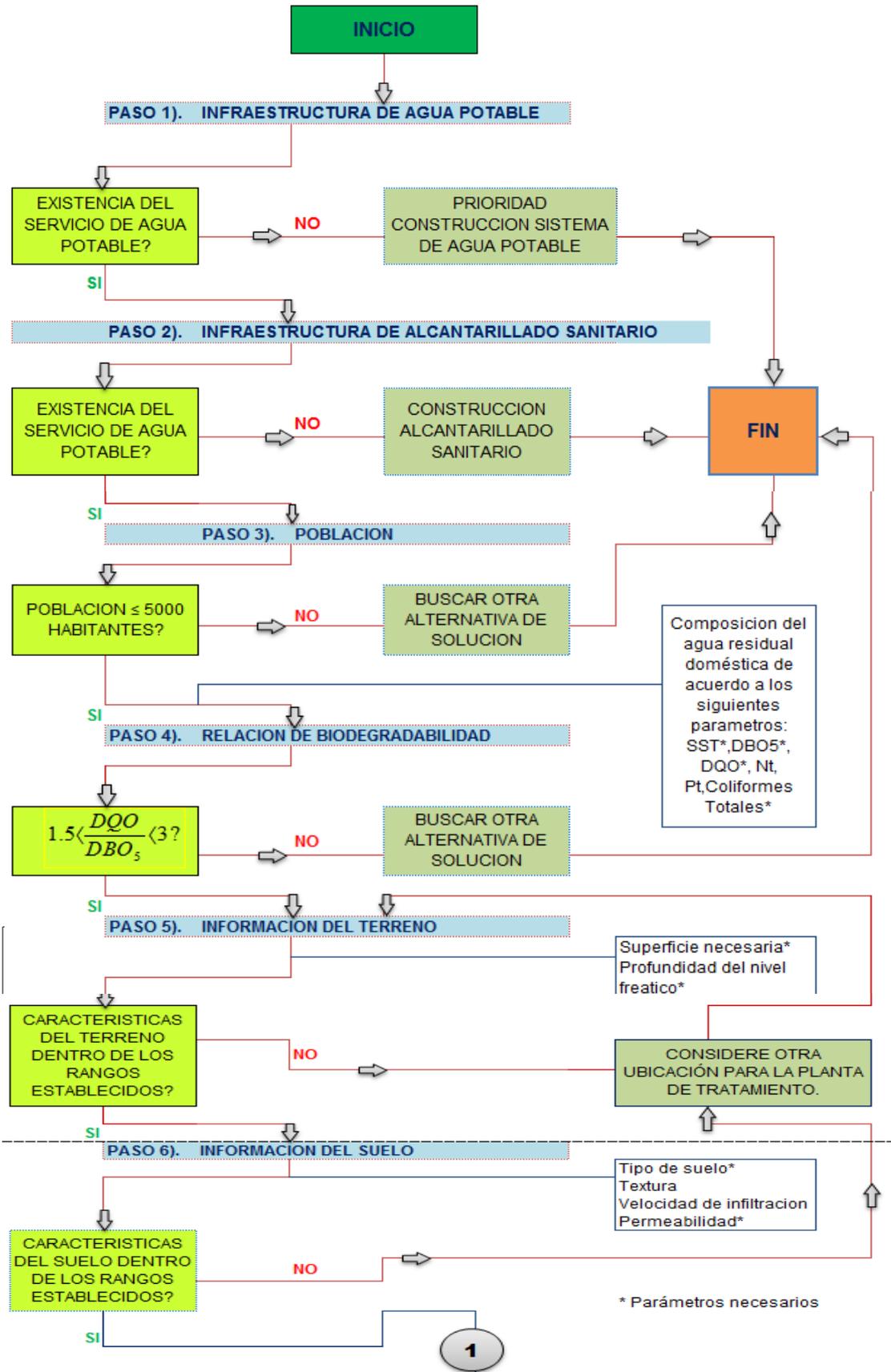
CRITERIOS	VARIABLES	TECNOLOGÍA				
		IR	IL	ES	HF L	HSS
<b>Remoción de los parámetros básicos</b>	Remoción de SST (%)					
	Remoción de DBO (%)					
	Remoción de DQO (%)					
	Remoción nitrógeno Total (%)					
	Remoción de fósforo total (%)					
	Remoción de coliformes fecales (%)					
<b>Impacto ambiental sobre el entorno</b>	Suelo					
	Geomorfología del suelo					
	Contaminación del suelo					
	Contaminación de agua					
	Recarga cuerpo receptor y riego					
	Contaminación del aire					
<b>Impacto ambiental sobre el entorno</b>	Generación de olores					
	Proliferación de vectores					
	Polvo					
	Ruido					
	Árboles					
	Arbustos					
	Hierbas					
	Cultivos					
	Pájaros (aves)					
	Animales terrestres					
	Paisaje					
	Agricultura					
	Ganadería					
	Empleo					
Servicios básicos						

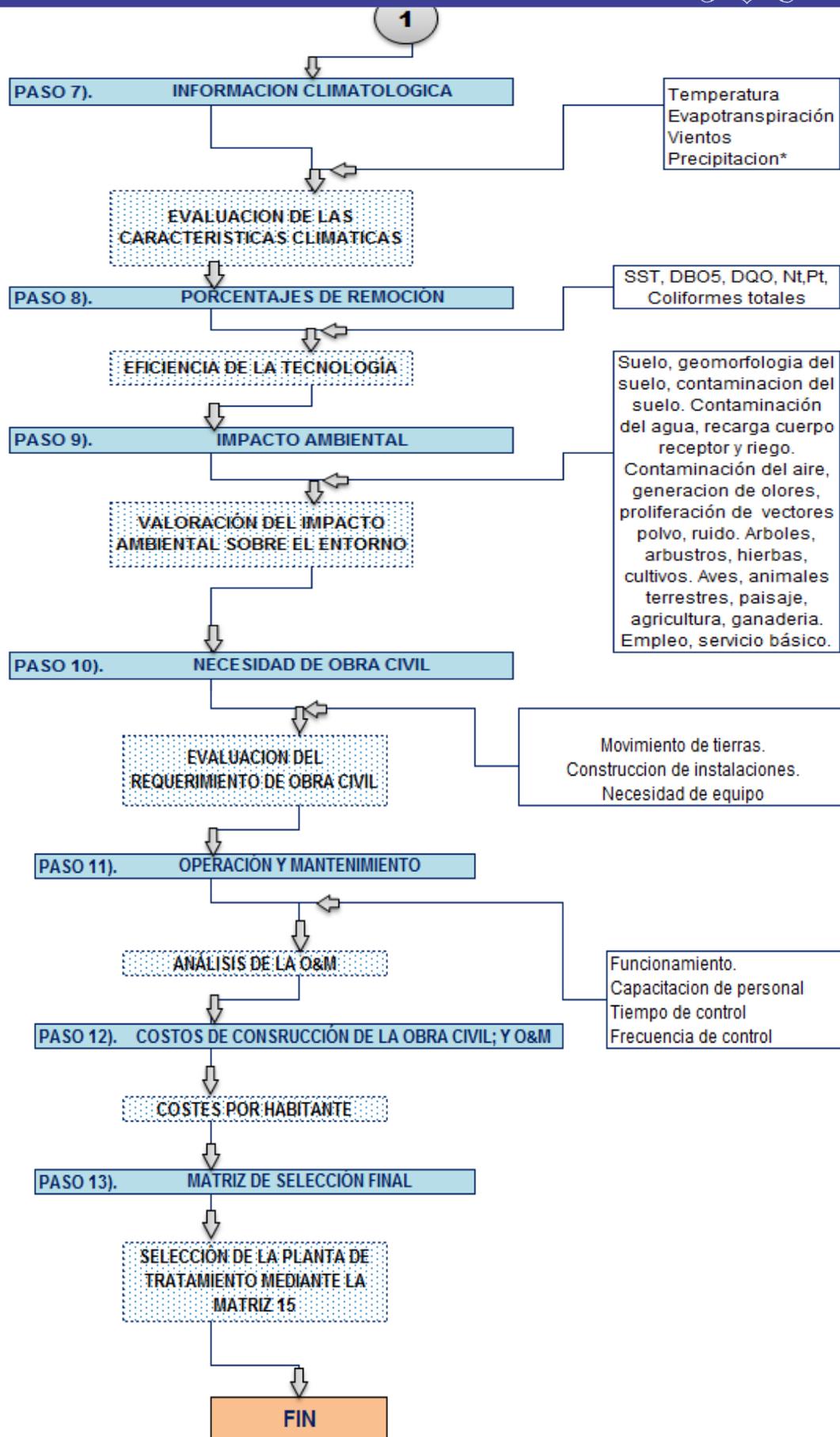
... Continuación

CRITERIOS	VARIABLES	TECNOLOGÍA				
		IR	IL	ES	HF L	HSS
<b>Tecnologías de tratamiento y su necesidad de obra civil</b>	Movimiento de tierra (Adimensional)					
	Construcción de instalaciones (Adimensional)					
	Necesidad de equipo (Adimensional)					
<b>Operación y mantenimiento para cada tecnología de tratamiento.</b>	Funcionamiento (Adimensional)					
	Capacitación del personal (Adimensional)					
	Tiempo de control (Adimensional)					
	Frecuencia de control (Adimensional)					
<b>Costos de construcción</b>	Coste por habitante(USD/hab)					
<b>Costos mensuales de operación y mantenimiento</b>	Coste por habitante (USD/hab/año)					
<b>SUMATORIA TOTAL</b>						

Fuente: Huallpa et al., (2010). Guía para la selección de tecnologías de depuración de aguas residuales por métodos naturales. Universidad Técnica Particular de Loja.

a. Diagrama de selección del sistema de tratamiento de aguas residuales como propuesta.





## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 ASPECTOS GENERALES

##### 3.1.1 Ubicación del área de estudio

###### a. Ubicación política:

Región : Puno

Departamento : Puno

Provincia : Huancané

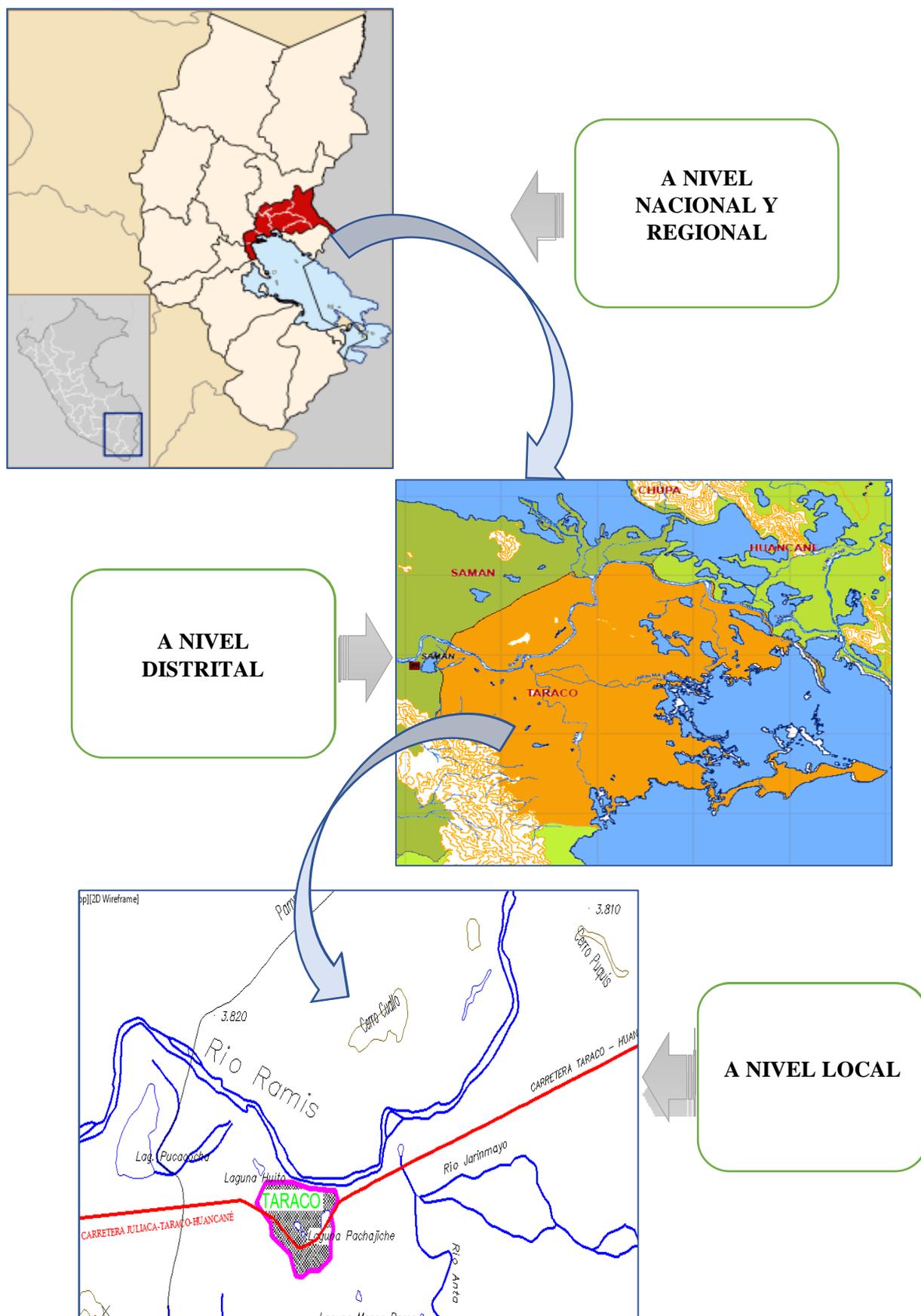
Distrito : Taraco

###### b. Ubicación geográfica:

Latitud Sur : 15° 14' 50"

Longitud Oeste : 69° 58' 50"

Altitud : 3,825 metros m.s.n.m.



**Figura 20. Localización de la zona de intervención**

Fuente: elaboración propia

### 3.1.2 Accesibilidad a la localidad del distrito de Taraco

La principal vía de acceso a la localidad del distrito de Taraco es vía terrestre desde la ciudad de Juliaca y de la ciudad de Huancané, siendo el transporte continuo, es decir todos los días y un factor que favorece a este distrito es la ubicación debido a que se ubica encima de carretera de Juliaca a Huancané siendo favorable para el comercio.

Las demás vías que existen son de transporte terrestre, trocha carrozable, caminos de herradura, desde las diferentes partes ya sean comunidades, centros poblados, parcialidades e incluso del distrito de Pusi, Samán.

Las principales vías de acceso se indican en la Tabla 20:

**Tabla 20:**

#### Vías de acceso a la localidad del distrito de Taraco

Desde	A	Tipo de Vía	Medio de Transporte	Distancia (Km.)	Tiempo (Hrs.)	Frecuencia
Puno	Juliaca	Asfaltado	Vehículo	45.00	1.0 Hrs.	Diario
Juliaca	Taraco	Asfaltado	Vehículo	30.00	0.30 Hrs.	Diario
Huancane	Taraco	Asfaltada	Vehículo	30.00	0.30 Hrs	Diario

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.1.3 Características generales del ámbito de estudio

Este conocimiento se logra a través de un diagnóstico integral cuya precisión depende del conocimiento de las características del ámbito de estudio.

#### a. Precipitación

El método utilizado para los cálculos de precipitación media mensual es de la media aritmética (MA), consiste en calcular el promedio aritmético de las precipitaciones mensuales de todos los años de registro disponibles de la estación climatológica Taraco. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 21:

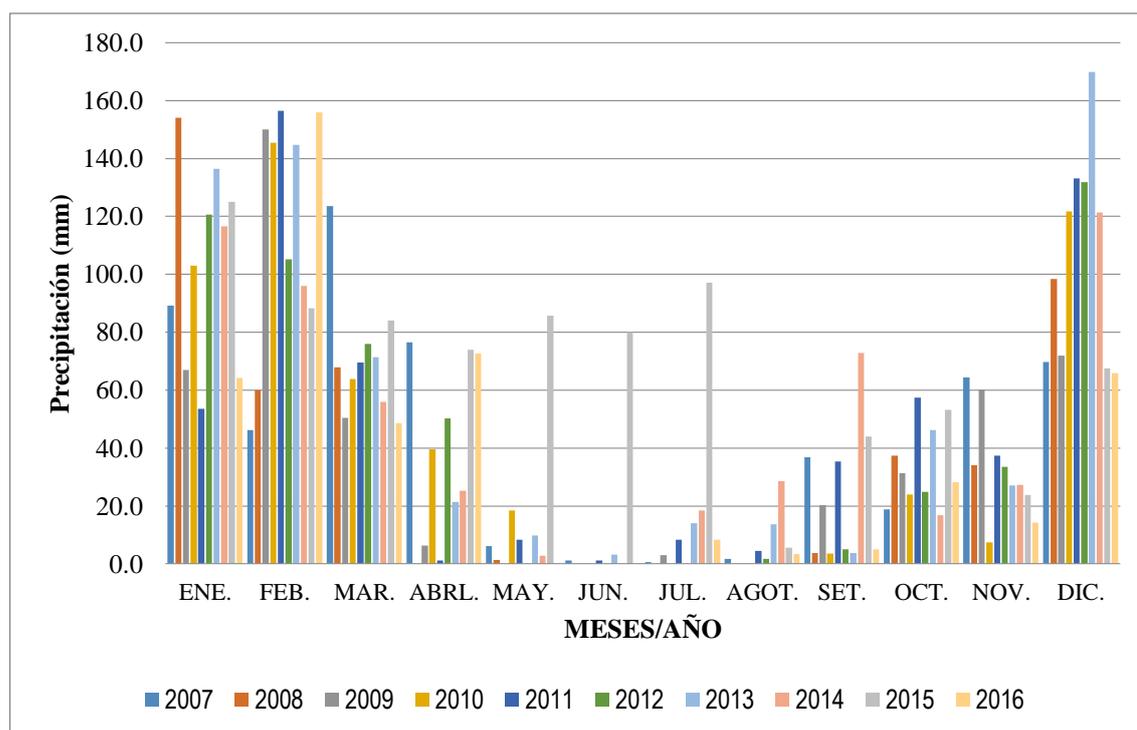
**Tabla 21:**

**Precipitación media mensual en la localidad de Taraco**

PARAMETRO: PRECIPITACION TOTAL MENSUAL EN mm.												
MESES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
MEDIA MENSUAL	103.0	114.8	71.1	36.7	13.3	8.6	15.0	5.9	23.0	33.8	32.9	105.2

**Fuente:** SENAMHI

La figura 21, muestra que la época lluviosa está comprendida entre los meses de setiembre a abril, registrándose una precipitación media de 114.8 mm. La época seca se encuentra comprendida entre los meses de mayo a agosto, donde se registra muy poca incidencia de lluvia.



**Figura 21. Variación de la precipitación con respecto al tiempo**

**b. Temperatura**

Los datos de la temperatura de la localidad se obtuvieron de los registros de la estación 110820, utilizando la media aritmética (MA), ver Tabla 22 y Figura 22.

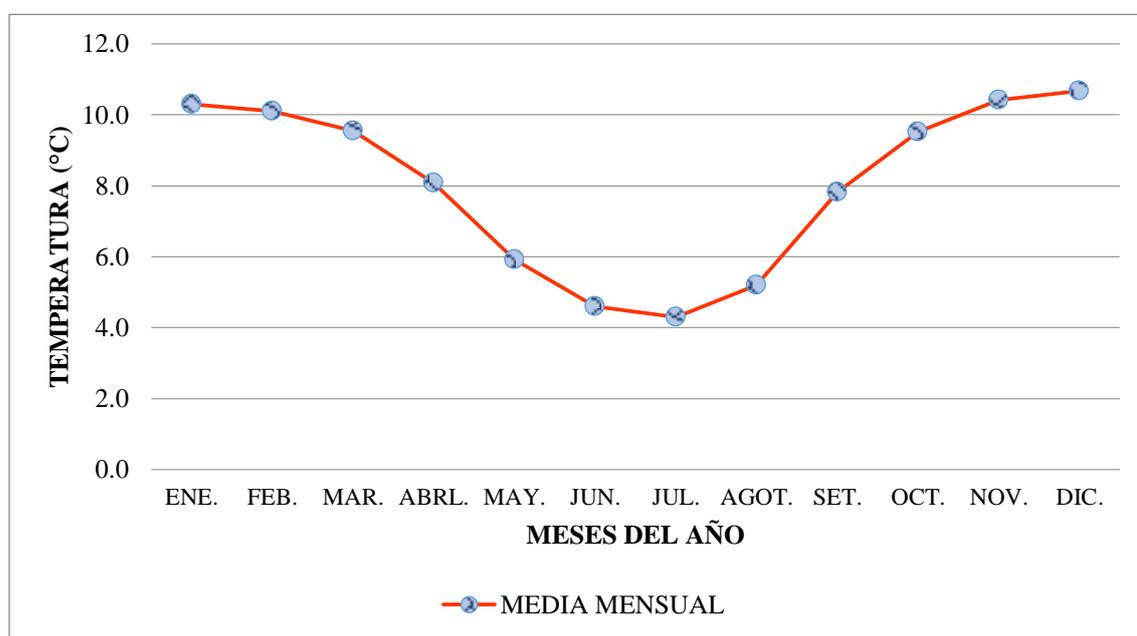
**Tabla 22:**

**Temperaturas medias mensuales en la localidad de Taraco**

PARAMETRO : PROMEDIO MENSUAL DE TEMPERATURA MEDIA EN °C												
MESES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
MEDIA	10.8	10.6	9.6	8.4	6.1	3.6	3.4	4.8	7.7	8.6	8.8	9.7

MENSUAL

Fuente: SENAMHI

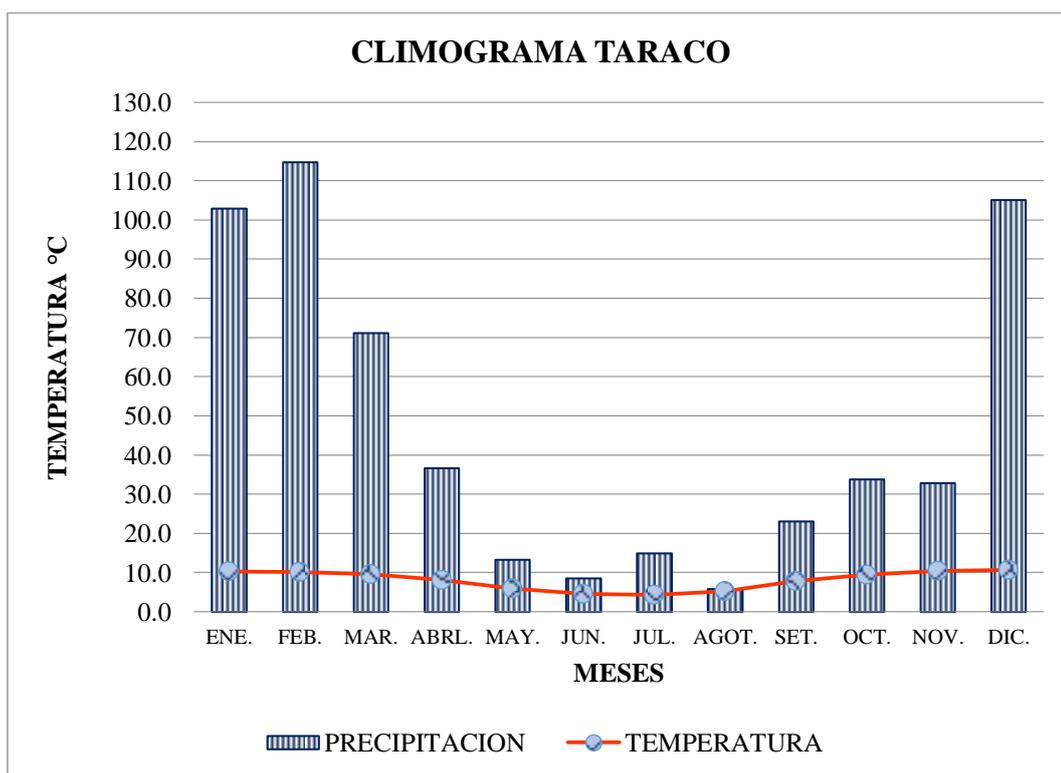


**Figura 22. Variación de temperatura con respecto al tiempo**

Fuente: Elaboración propia

**c. Climograma de la localidad de Taraco**

Para mejor interpretación de los resultados de precipitación y temperatura, es importante representar en un climograma el periodo de aridez de la zona, designada así al lapso de tiempo en que la curva de temperatura esta sobre la curva de precipitación.



**Figura 23. Climograma de la localidad del distrito de Taraco**  
Fuente: Elaboración propia

La figura 23 muestra que no existe periodo de aridez, por lo tanto, la población cuenta con agua en casi toda la temporada ya sea para riego de productos y pastizales.

**d. Viento**

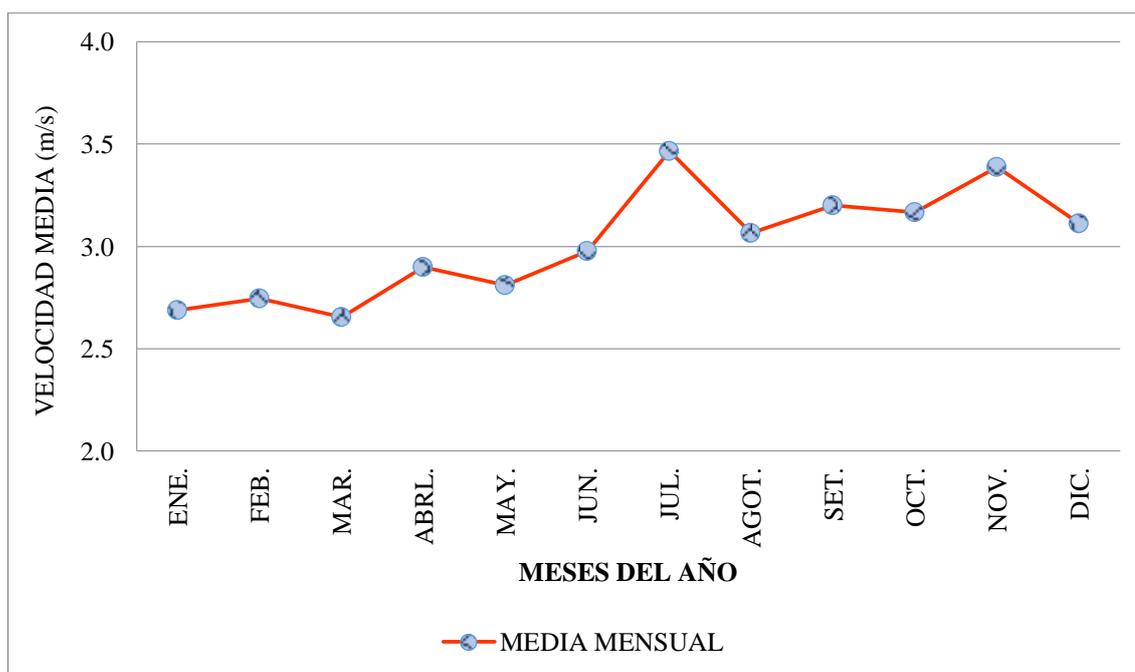
Las velocidades medias mensuales se han calculado utilizando el método de la media aritmética (MA), los resultados se presentan en la siguiente Tabla 23:

**Tabla 23:**

**Velocidad media mensual del viento en la localidad de Taraco**

PARAMETRO: PROMEDIO MENSUAL DE VELOCIDAD DE VIENTO EN M/SEG.												
MESES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
MEDIA MENSUAL	2.7	2.7	2.7	2.9	2.8	3.0	3.5	3.1	3.2	3.2	3.4	3.1

**Fuente: SENAMHI**



**Figura 24. Variación de la velocidad del viento con respecto al tiempo en la localidad de Taraco**

Fuente: Elaboración propia en base a datos del SENAMHI

De la figura 24 se observa que la velocidad media más alta en la localidad de Taraco se presenta en el mes de julio con un valor de 3.5 m/s. La velocidad del viento empieza a aumentar desde el mes de junio hasta el mes de noviembre.

#### e. Evapotranspiración

La cantidad de agua absorbida por la vegetación más la evaporación producida por las temperaturas influenciadas por los días soleados, se cuantifican mediante el cálculo de la evapotranspiración.

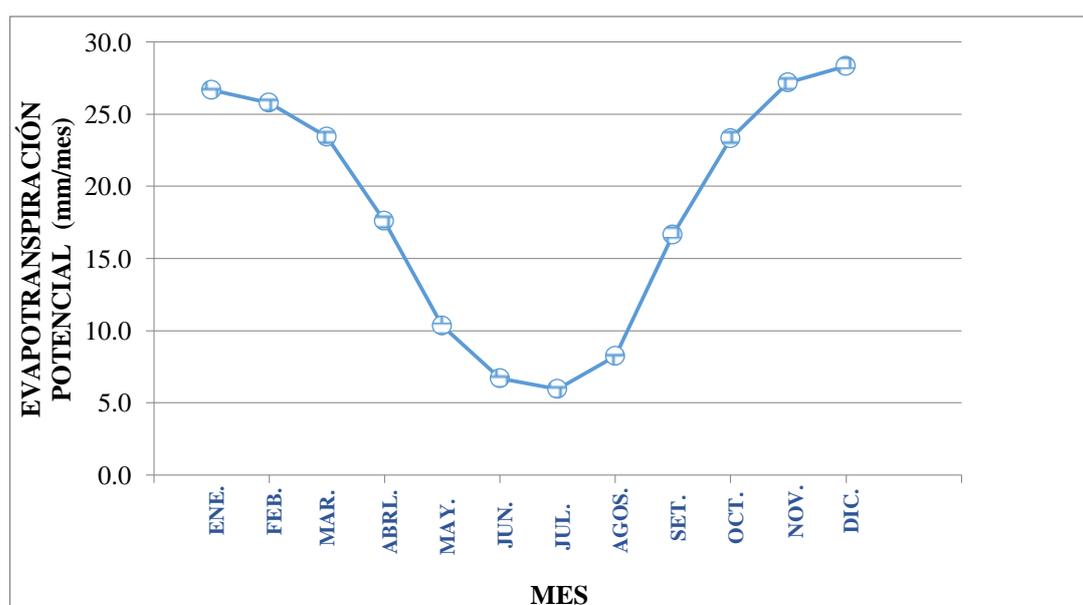
Se determinó la evapotranspiración por el método de Thornthwaite, el cual requiere datos de temperaturas medias mensuales para su análisis. El cálculo y resultados se muestran a continuación (Tabla 24):

**Tabla 24:**

**Cálculo de evapotranspiración mensual en la localidad de Taraco.**

VALORES MENSUALES												
Concepto	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Temperatura media °C	10.3	10.1	9.6	8.1	5.9	4.6	4.3	5.2	7.8	9.5	10.4	10.7
Índice de calor mensual "i"	3.0	2.9	2.7	2.1	1.3	0.9	0.8	1.1	2.0	2.7	3.0	3.2
Índice de calor anual "I"	76.4											
Parámetro "a"	1.7											
ETP sin ajustar (mm/mes)	26.7	25.8	23.4	17.6	10.3	6.7	6.0	8.3	16.7	23.3	27.2	28.3
Número de horas del sol	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
Número de días al mes	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
ETP (mm/mes)	26.0	23.3	24.2	18.3	11.4	7.2	6.6	9.0	16.9	23.7	25.8	27.3

Fuente: elaboración propia



**Figura 25. Variación de la evapotranspiración a lo largo del año – Taraco**

Fuente: Elaboración propia

De la figura 25, se puede descifrar que los valores más altos de evapotranspiración se encuentran entre los meses de octubre a marzo.

#### f. Balance hídrico

Partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración mensual se puede determinar el balance hídrico en el suelo a lo largo del año, permitiendo evaluar la disponibilidad, exceso y déficit del agua en el suelo.

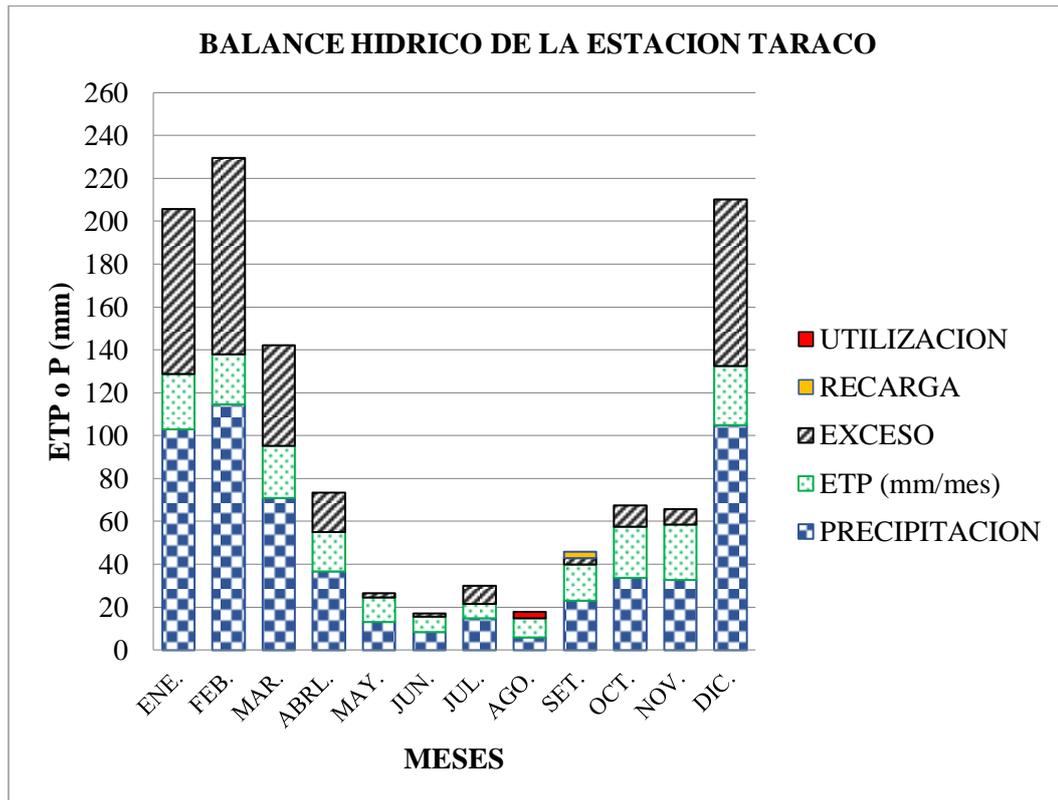
Para el estudio de este parámetro se ha utilizado el método directo propuesto por Thornthwaite y Matter, según el cual se pierde agua para poder generar la evapotranspiración potencial hasta agotar la reserva (ver Tabla 25).

**Tabla 25:**

#### **Cálculo del balance hídrico del suelo en la localidad de Taraco**

Concepto	VALORES MENSUALES											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ETP (mm/mes)	26.0	23.3	24.2	18.3	11.4	7.2	6.6	9.0	16.9	23.7	25.8	27.3
Precipitación (mm)	103.0	114.8	71.1	36.7	13.3	8.6	15.0	5.9	23.0	33.8	32.9	105.2
Precipitación - ETP	77.0	91.5	46.9	18.4	1.9	1.3	<u>8.4</u>	-3.0	6.1	10.1	7.1	77.8
Reserva del suelo	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	<u>100.0</u>	97.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Variación de la reserva	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.0	3.0	0.0	0.0	0.0
ETR (mm/mes)	26.0	23.3	24.2	18.3	11.4	7.2	6.6	5.9	16.9	23.7	25.8	27.3
Deficit o sequia												
Exceso de agua	77.0	91.5	46.9	18.4	1.9	1.3	8.4		3.1	10.1	7.1	77.8

**Fuente:** elaboración propia



**Figura 26. Balance hídrico de la localidad de Taraco**

Fuente: Elaboración propia

En la figura 26, se observa claramente el balance hídrico en el suelo en los diferentes meses a lo largo del año, de esta forma que entre los meses de diciembre y abril existe gran cantidad de agua sobre el suelo, mientras que en los siguientes meses se nota una disminución considerable de la cantidad de agua en el suelo.

**g. Geomorfología**

La localidad del distrito de Taraco presenta una topografía bastante regular plana presentando una pendiente promedio de 1° a 8° con un porcentaje de 0.01% a 0.08%. En general el lugar presenta una pendiente promedio de 2°, la superficie del suelo está conformada de tierra agrícola hasta una altura variable de 0.50 metros, posteriormente a esta estratigrafía esa conformado por un estrato de material arenosa, limo arcilloso. La localidad del distrito de taraco está atravesada por corridas de aguas del río Ramis por el lado del margen derecho.

**h. situación socioeconómica**

En lo referente a este punto podemos diferenciar que su actividad económica productiva principal está basada en la ganadería y agricultura y en poca cantidad en el rubro de negocio regional, asimismo los pobladores trabajan en el sector de educación y salud, seguido de los que trabajan independientemente en zonas comerciales. La población económicamente activa fluctúa entre las edades de 20 – 64 años de edad, el ingreso promedio calculado es de 450 – 1000 nuevos soles, variación que se sustenta por las diferencias en que labora cada familia.

**i. Población**

El distrito de Taraco de acuerdo a los datos del Censo Nacional de Población y Vivienda de 2007, cuenta con 1 387 habitantes en la zona urbana (ver Tabla 26).

**Tabla 26:****Población total, por grandes grupos de edad - Taraco**

SEXO	ÁREA URBANA	GRANDES GRUPOS DE EDADES (AÑOS)					
	TOTAL	MENOS DE 1	1 A 14	15 A 29	30 A 44	45 A 64	65 A MÁS
URBANA	<b>1 387</b>	22	417	372	269	229	78
Hombres	<b>718</b>	15	224	183	142	114	40
Mujeres	<b>669</b>	7	193	189	127	115	38
RURAL	<b>13 270</b>	162	3 828	3 131	2 241	2 473	1 435
Hombres	<b>6 514</b>	90	1 983	1 549	1 086	1 117	689
Mujeres	<b>6 756</b>	72	1 846	1 582	1 155	1 356	746

**Fuente:** INEI - Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda

## **j. Servicios Públicos**

El distrito de Taraco actualmente cuenta con los siguientes servicios públicos:

- En el área del sector salud, un centro de salud - categoría I-4.
- Comisaría de la Policía Nacional del Perú.
- En el área de energía eléctrica, cuentan con el servicio de energía eléctrica durante las 24 horas del día.
- En el área de comunicaciones, cuentan con el servicio de radio emisoras y receptoras que permiten captar la señal de cobertura nacional, así como televisivas y diarios de circulación nacional y regional.
- En el área de telecomunicaciones, cuentan con el servicio de teléfonos fijos y celulares.
- Área educativa, cuentan con niveles de inicial (02), primaria (02) y secundaria (02).

## **k. Servicios Básicos**

### **Agua potable**

La población del distrito de Taraco cuenta con servicios de agua potable de manera restringida que no abastece en su totalidad las 24 horas. En la actualidad el abastecimiento de agua se realiza a través la captación de aguas subterráneas, la principal fuente de abastecimiento (pozo – caisson) se encuentra al margen del río Ramis situándose en la localidad misma, que mediante bombas eléctricas se eleva el agua hasta un tanque elevado de concreto armado para su posterior distribución. La cobertura de este servicio en la población es de 80%.

## Desagüe

La población del distrito de Taraco, cuenta con el servicio de alcantarillado sanitario en estado precario cubriendo en un 70% aproximadamente de la población, con falta de mantenimiento, en su sistema existe un déficit considerable, cabe recalcar que la topografía es muy llana el cual no permite ampliar los servicios de alcantarillado presentado el sistema pendientes muy bajas por lo que no es posible la evacuación de aguas residuales de una manera eficiente, existen algunos buzones obstruidos con sólidos depositados, así también se tiene déficit en lo referente al tratamiento de aguas residuales, siendo el tratamiento mediante lagunas de estabilización de forma similar con falta de mantenimiento ubicados en dos puntos incumpliendo las distancias mínimas establecidas en la norma OS.090 (Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales).

- 500 m como mínimo para tratamientos anaerobios;
- 200 m como mínimo para lagunas facultativas;
- 100 m como mínimo para sistemas con lagunas aeradas y
- 100 m como mínimo para lodos activados y filtros percoladores.

### 3.1.4 Descripción del sistema de tratamiento de aguas residuales de la localidad del distrito de Taraco

La localidad del distrito de Taraco cuenta con dos sistemas de tratamiento de aguas residuales debido a la topografía plana que presenta.

**Sistema de tratamiento N° 01:** consta solamente de una laguna de estabilización tipo anaeróbica cuyo fin ha sido mejorar la calidad del agua residual proveniente del alcantarillado sanitario de una parte de la población. Así también cuenta con un cerco perimétrico de concreto ciclópeo que impide el fácil acceso hacia el

interior de la misma. Se debe especificar que no cuenta con estructuras de pretratamiento, ni tratamiento primario, terciario.

El sistema de tratamiento N° 01 se encuentra en un estado de colapso con sedimentación de sólidos que han llegado a ocupar gran parte de la laguna. La ubicación geográfica de dicho sistema de muestra en la Tabla 27, así como en la Figura 27.

**Tabla 27:**

**Ubicación geográfica y coordenadas del sistema de tratamiento N° 01**

UBICACIÓN GEOGRÁFICA		
Puntos	Laguna primaria	Efluente
Sistema de coordenadas	UTM WGS 84	
Zona	Zona 19L Sur	
Norte	395749.548m	8308703.109m
Este	395749.548m	0395774.339m
Altitud	3828.24m	3825.79m

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 27. Sistema de tratamiento N° 01 – Distrito de Taraco**

Fuente: Elaboración propia

Sistema **de tratamiento N° 02**: se encuentra al lado oeste del distrito de Taraco.

El sistema de tratamiento de aguas residuales consta de un sistema por lagunaje en serie, la laguna primaria está construido de material arcilla, esta no cuenta con un tratamiento previo, ni con cerco perimétrico, la laguna secundaria está construido de material mampostería de concreto, dicha laguna tiene cerco perimétrico con maderas rollizo, implementado con alambres púas, el efluente de este sistema es el rio Ramis punto aguas arriba de la captación de agua para consumo humano para la misma localidad.

En la Tabla 28 se presenta la ubicación geográfica y coordenadas de la misma, por otro lado, en la Figura 28 se adjunta las fotografías de dicho sistema de tratamiento y en la Figura 29 se adjunta una fotografía de ambos sistemas de tratamiento de las cuenta la localidad del distrito de Taraco.

**Tabla 28:**

**Ubicación geográfica y coordenadas del sistema de tratamiento N° 02**

<b>UBICACIÓN GEOGRÁFICA</b>			
<b>Puntos</b>	<b>Laguna Primaria</b>	<b>Laguna Secundaria</b>	<b>Efluente</b>
Sistema de coordenadas		UTM WGS 84	
Zona		Zona 19L Sur	
Norte	8308730.892m	8308723.681m	8308787.384m
Este	394575.964m	394607.961m	394683.687m
Altitud	3829.27m	3829.14m	3826.27m

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 28. Sistema de tratamiento N° 02 – Distrito de Taraco**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 29. Localización de los sistemas de tratamiento – Distrito de Taraco**

Fuente: Google earth

### 3.2 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS EN GABINETE Y CAMPO

#### **Materiales utilizados en gabinete:**

- ✓ Laptop core I5. Toshiba
- ✓ Memoria USB hp 8g.
- ✓ Impresora Epson L455.
- ✓ Paquetes de Papel bond 80 gr
- ✓ Software (Word, excel. Autocad 2014)

#### **Materiales utilizados en campo:**

- ✓ Termómetro Portátil
- ✓ Wincha de Lona de 50m.
- ✓ Flexometro Stanley de 5m
- ✓ Recipientes de ½ y 1.0 litro de capacidad.
- ✓ Cronometro ET-K9318
- ✓ Guantes Quirúrgicos
- ✓ Tubería de PVC SAL diam=2”
- ✓ Fichas de registro de campo
- ✓ Cadena de custodia
- ✓ Papel secante
- ✓ Cinta adhesiva
- ✓ Plumón indeleble
- ✓ Frascos debidamente etiquetados
- ✓ Cajas térmicas de tecnopor
- ✓ Hielo
- ✓ Bolsas de poliburbujas u otro material de embalaje adecuado
- ✓ Reloj

- ✓ Pizarra acrílica pequeña 0.40x0.30m
- ✓ Plumones acrílicos
- ✓ Mochila
- ✓ Pala
- ✓ Pico
- ✓ Balde de volumen conocido
- ✓ Cuadernillo

#### **Equipos utilizados en campo**

- ✓ GPS. garmin map
- ✓ Cámara fotográfica
- ✓ Estación total Sokkia y componentes
- ✓ Indumentaria de protección
- ✓ Gafas de seguridad
- ✓ Guantes de jebe
- ✓ Guantes de látex descartables
- ✓ Respirador con cartucho para gases y polvo
- ✓ Mascarilla descartable
- ✓ Mandil blanco

#### **Equipos y herramientas utilizados en laboratorio - EPIC**

- ✓ Balanza de 0.01g
- ✓ Recipientes de aluminio (taras)
- ✓ Horno de secado
- ✓ Espátulas
- ✓ Aparato de límite líquido o de Casagrande
- ✓ Acanalador

- ✓ Conjunto de tamices de malla graduada
- ✓ Agua
- ✓ Cepillo
- ✓ Brocha
- ✓ Cuchillo
- ✓ Hoja de vidrio doble
- ✓ Permeámetro de carga variable
- ✓ Bureta graduada
- ✓ Material arcilloso (pashalla).

### **3.3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.3.1 Naturaleza del estudio**

El alcance de la investigación efectuado según su finalidad es de tipo aplicativo, porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos que se adquieren; el diseño de la investigación es no experimental, ya que no se manipularon ninguna de las variables deliberadamente es decir las variables independientes ya han ocurrido y no pueden ser manipuladas lo que impide influir sobre ellas para modificarlas como es el caso de los caudales a tratar, nivel de contaminación de los efluentes líquidos que se determinaron tal como sucede.

El nivel de estudio es de tipo tecnológico, donde se intenta proponer una solución al problema de contaminación por efluentes líquidos, lo que implica explorar, describir y proponer alternativas de cambio y no necesariamente ejecutar la propuesta.

#### **3.3.2 Metodología para la medición de caudales y temperatura**

Para medir el caudal de las aguas residuales en el ingreso y la salida de los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes en la localidad del distrito de

Taraco, se empleó el método volumétrico, que consiste en medir mediante un cronómetro el tiempo que se tarda en llenar un recipiente de volumen conocido.

La medición de la temperatura de aguas residuales se llevó conjuntamente con la medición de los caudales mediante el uso de termómetro ambiental.

Las mediciones de los caudales de las aguas residuales se realizaron en un total de dos campañas en diferentes fechas, cada campaña corresponde a épocas de lluvia y épocas de estiaje respectivamente. Cabe señalar las mediciones se realizaron a partir de las 6:00 AM hasta las 6:00 PM cada una hora durante el día.

En la Tabla 29, se muestra las fechas escogidas para la medición de los caudales de las aguas residuales y en la Figura 30 se adjunta una fotografía de la actividad realizada.

**Tabla 29:**

**Fechas de medición de caudales de las aguas residuales**

Fecha de medición	N° de campaña	Época
29/09/2016	01	Sequía
30/01/2017	02	Lluvia

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 30. Medición de caudal y temperatura en campo**

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3 Metodología para el muestreo de aguas residuales

Para la caracterización de las aguas residuales se requiere de técnicas apropiadas de muestreo que asegure la representatividad de las mismas, ya que los datos que se deriven de los análisis de las muestras serán la base para el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales. Consiguientemente, se efectuó los siguientes procedimientos a seguir:

La ubicación del punto de muestreo se fijó convenientemente de acuerdo a las especificaciones de la Oficina de Medio Ambiente (OMA) y del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) y del Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Autoridad Nacional del Agua – DGCRH.

Los puntos de monitoreo fueron dos: en la entrada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y en el dispositivo de salida de la PTAR.

Para el análisis físico químico se seleccionó el tipo de muestra compuesta, siendo recolectada la primera muestra individual a las 06.00 AM, repitiéndose las mismas instrucciones de la primera cada dos horas durante el día, ya en el laboratorio se realizó el mezclado correspondiente. Del mismo modo para toma de muestras de los coliformes fecales, se optó el tipo de muestra compuesta que se recogió 4 muestras individuales cada dos horas partir del mediodía mezclándose en un recipiente de vidrio de 1 L, recolectándose una muestra compuesta por día.

Los muestreos se realizaron en un total de dos campañas de muestreo en las mismas fechas y días de las mediciones de los caudales. Las muestras para los análisis de laboratorio se recogieron en un total de 4 L por punto de monitoreo en un recipiente de material de vidrio transparente para el análisis físico químico, y frascos de vidrio de boca ancha color ámbar para aceites - grasas y frascos de vidrio transparente previamente esterilizado destinado para el análisis microbiológico, debidamente

rotulados, indicando fecha, hora, lugar de muestreo y origen. Luego de haber terminado la recolección de las muestras inmediatamente se procedió al traslado hacia el laboratorio a una temperatura de 4 °C para su respectivo análisis.

En la Figura 31 y la Figura 32 se presenta fotografías de las actividades realizadas en los puntos de muestreo.



**Figura 31. Muestreo de aguas residuales - época sequía**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 32. Muestreo de aguas residuales - época lluvia**  
Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4 Metodología para la caracterización físico química y microbiológica de las aguas residuales

En esta etapa se realizaron los análisis físicos-químicos y microbiológicos de las muestras de las aguas residuales en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química y la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno así como se ilustran en la Figura 31 y Figura 32.



**Figura 31. Caracterización físico-química de aguas residuales – Laboratorio de Facultad de Ingeniería Química UNA Puno**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 32. Caracterización microbiológica de aguas residuales – Laboratorio de Facultad de Ciencias Biológicas UNA Puno**

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5 Metodología para la propuesta de mejoramiento

En base a la evaluación realizada a los sistemas de tratamiento de aguas residuales de la localidad del distrito de Taraco, se plantean dos propuestas de mejoramiento:

#### a. Mejorar los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes actualmente, mediante:

- *Sistema de tratamiento N° 01*: la reconstrucción integral de un nuevo sistema de tratamiento, debido a que la actual se encuentra en un estado de colapso total, ya que consta de una única laguna sin protección de taludes como sistema de tratamiento.

Para este efecto se tendrá que rediseñar el sistema de tratamiento, con los datos obtenidos en la evaluación, considerar algunos componentes como cámara de rejillas, desarenador, desengrasador.

- *Sistema de tratamiento N° 02*: Mejorar la PTAR actual, mediante la construcción de los componentes de tratamiento preliminar, refacción de una de las lagunas facultativas (la más antigua – laguna N° 01) y la construcción de una laguna de maduración adicional a la existente. La laguna facultativa funcionaría paralela a la existente para lograr un adecuado manejo de los lodos y aproximarse a los tiempos de retención hidráulica recomendados. La laguna de maduración servirá para mejorar la calidad de agua del efluente, principalmente en la remoción de patógenos.

Para este efecto se tendrá que rediseñar la laguna, con los datos obtenidos en la evaluación, considerar algunos componentes como cámara de rejillas, desarenador, desengrasador, cambio de tapas y compuertas metálicas que se encuentran deterioradas.

**b. Reubicar el sistema de tratamiento N° 02 a una zona más adecuada**, ya que ésta se encuentra muy próxima a la población y genera malestar por los malos olores incumpliendo con la distancia mínima establecida en el Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma OS 090.

Como el sistema de tratamiento de aguas residuales N° 01 necesita una reconstrucción total de sus componentes sería justo y necesario que la localidad de Taraco cuente con un único sistema de tratamiento de aguas residuales, el cual se ubicaría en la zona de ubicación del sistema de tratamiento N° 01, ya que no se dispone de otro terreno para tal fin por parte del municipio del distrito de Taraco. Para lo cual se debe unir los colectores del sistema de tratamiento N° 02 hacia el sistema de tratamiento N° 01, favorecido por una pendiente mínima de acuerdo a la topografía de la zona.

Por otra parte, el nuevo sistema de tratamiento de aguas residuales debe comprender la construcción de componentes de tratamiento preliminar, primario y secundario, seleccionándose el tipo de tratamiento que se adapte mejor a las condiciones de la zona.

### **3.3.6 Metodología para la propuesta de mejoramiento - selección de la tecnología**

De acuerdo a los criterios se han identificado los factores a tener en consideración en la toma de decisión del tipo del tratamiento a implementar en las condiciones propias de la localidad de estudio, las cuales se mencionan a continuación:

**a. Factor técnico:** disponibilidad del área de terreno suficiente, que es de una media aproximadamente, la eficiencia de la tecnología debe ser de moderada a alta, el nivel de tratamiento debe ser primario y secundario y la facilidad de operación y mantenimiento debe ser lo más sencillo posible.

**b. Factor económico:** el costo de la construcción, operación y mantenimiento deben ser bajos, lo que significa que no debe requerir de insumos, equipos, energía, ni mano de obra calificada. El costo de inversión debe ser moderada.

**c. Factor ambiental:** Se evitará seleccionar un proceso de tratamiento, en el que el consumo de energía en la etapa de operación sea considerable y la presencia de la contaminación del subsuelo.

Las tecnologías naturales son las apropiadas al medio por sus características de la zona con poblaciones pequeñas. Estas tecnologías comprenden comúnmente los lagunajes, humedales artificiales y el tratamiento sobre el terreno.

Mediante la matriz de selección se definió la mejor alternativa de tratamiento, considerando 13 criterios con un total 58 variables de selección, cada variable de la matriz de selección se ha valorizado cuantitativamente dependiendo de su condición si es favorable/apto con el número 5, medianamente favorable/moderado con el número 3 y por ultimo casi nada/no apto con el número 1.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSION

#### 4.1 IDENTIFICACIÓN

Esta fase consistió en la recopilación de información acerca de la ubicación del sistema, condiciones físicas y climáticas del ámbito donde se encuentra operando, y descripción del sistema de la planta de tratamiento de aguas residuales, así también se buscó información, en la municipalidad distrital de Taraco, sobre el diseño inicial de los sistemas con el cual fue construido, lamentablemente no se obtuvo información relevante.

#### 4.2 UBICACIÓN, CONDICIONES FÍSICAS Y CLIMATOLÓGICAS, DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Los sistemas de tratamientos de aguas residuales de distrito de Taraco están localizados y descritos en el ítem anterior, el cual consta de dos sistemas de tratamiento ambos por medio de lagunas de estabilización, siendo los componentes del sistema de tratamiento 01: 01 cámara de llegada – condición física en estado de colapso, 01 laguna primaria - condición física en estado de colapso por sedimentación de lodos, 01 cámara de compuerta en la salida - condición física en estado de colapso. En el sistema de tratamiento N° 02 se pudo verificar 01 cámara de llegada- condición física en estado de colapso, 01 laguna primaria - condición física en estado de colapso por sedimentación de lodos, y 01 laguna secundaria de estabilización interconectadas en serie, encontrándose 01 cámara de inspección entre ellos, 01 cámara de salida de tipo compuerta en la salida hacia el efluente, todas las estructuras mencionadas fueron

construidas en el año 1998, salvo la laguna secundaria del sistema de tratamiento N° 02 en el año 2010.

### **4.3 DIAGNÓSTICO**

#### **4.3.1 Situación actual**

En la actualidad los componentes se encuentran en un total abandono por las autoridades locales e instituciones encargadas del servicio de saneamiento, se puede apreciar lo siguiente:

- En primer lugar ninguno de los sistemas de tratamiento de agua residual cuenta con una cámara de rejillas o separador de sólidos al ingreso de la planta de tratamiento ni medidores de caudal en la entrada y salida.
- Las lagunas se encuentran en un estado de colapso, debido a la ausencia de la operación y mantenimiento respectivo ya que las lagunas primarias de ambos sistemas son de tierra sin ninguna protección al terreno lo que implica que se estaría filtrando agua residual al subsuelo, solamente la laguna secundaria del sistema de tratamiento N° 02 cuenta con taludes emboquillados de piedra.
- Los sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo lagunar con la que se cuenta, trabajan sobrecargada de sedimentos, generando problemas de malos olores y entrega de efluentes de baja calidad sanitaria para su disposición al cuerpo receptor. Esta situación ha ocasionado en muchos casos el rechazo de la población afectada por este sistema de tratamiento. Este problema generalmente está ligado a la falta de programas de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento.
- La planta de tratamiento cuenta con un personal que lleva el control operacional y mantenimiento de las unidades que conforman los sistemas de tratamiento. Sin embargo el personal encargado no es calificado, capacitado, solamente realiza

trabajos de desatoro en las diferentes partes del sistema de alcantarillado y de la planta de tratamiento, limpieza de bolsas plásticas y otras partículas de tamaño considerable que ingresan a las lagunas de estabilización. El mismo personal de encarga del operación del sistema de agua potable por bombeo.

- Respecto a la estructuras de control, como es el caso de las compuertas se encuentran en proceso de alto deterioro, siendo necesariamente que sean cambiados debido a que son primordiales para el control y mantenimiento de las lagunas.

#### **a. Características del agua residual**

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales del distrito de Taraco están diseñadas para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, las cuales son transportadas por el sistema de alcantarillado o red colectora de la ciudad, contienen materia orgánica, nutrientes, patógenos, etc. Esta información se puede sustentar en los resultados obtenidos durante la investigación como se pueden visualizar en tabla 41.

#### **b. Población servida**

La población servida es la localidad del distrito de Taraco, la cual cuenta con 1387 habitantes de acuerdo al último censo 2007 de Población y IV de vivienda, pero no toda la población es usuaria directa del sistema de tratamiento de aguas residuales ya que una parte de la población no dispone del servicio de alcantarillado.

Para determinar la población servida seguimos los siguientes pasos:

*Para el sistema de tratamiento N° 01:*

- Caudal de desagüe = 1 lt/seg. Que es el 80% del  $Q_{mh}$
- Entonces el consumo máximo horario ( $Q_{mh}$ ) = 1.25 lt/seg.
- Despejando y remplazando valores en la fórmula:

$$Q_{mh} = 1.5Q_m(1/s.)$$

Tenemos que el consumo promedio diario ( $Q_m$ ) = 0.83 lt/seg.

- Finalmente calculamos la población servida con una dotación de 120 lt/hab/día en la siguiente fórmula:

$$Q_m = \frac{P_f * \text{dotación (l/s)}}{86,400}$$

- Despejando y reemplazando obtenemos
- **P=600 hab.** Población servida.

*Para el sistema de tratamiento N° 02:*

- Caudal de desagüe = 0.60 lt/seg. Que es el 80% del  $Q_{mh}$
- Entonces el consumo máximo horario ( $Q_{mh}$ ) = 0.75 lt/seg.
- Despejando y reemplazando valores en la fórmula:

$$Q_{mh} = 1.5Q_m(l/s.)$$

Tenemos que el consumo promedio diario ( $Q_m$ ) = 0.50 lt/seg.

- Finalmente calculamos la población servida con una dotación de 120 lt/hab/día en la siguiente fórmula:

$$Q_m = \frac{P_f * \text{dotación (l/s)}}{86,400}$$

- Despejando y reemplazando obtenemos
- **P= 360 hab.** Población servida.

### c. Operación y Mantenimiento

Actualmente el sistema de tratamiento de aguas residuales es administrado por la Municipalidad Distrital de Taraco.

El Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales N°01 del Municipio de Taraco se encuentra localizado al noreste de la ciudad a 189.42m a la vivienda más cercana y a

35.00m del margen derecho del río Ramis. Limita con terrenos parcelados dedicados a usos pecuarios.

El Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales N° 02 del Municipio de Taraco se encuentra localizado al oeste de la ciudad a 89.95m a la vivienda más cercana y a 69.06m del margen derecho del río Ramis. Limita con terrenos parcelados dedicados a usos pecuarios.

Se ha evidenciado que no se realiza la operación y mantenimiento correspondiente y se pudo apreciar el crecimiento de vegetación en su interior. Cabe mencionar que se ha evidenciado la filtración de aguas residuales en las lagunas primarias de ambos sistemas de tratamiento.

En todas las lagunas verificadas se ha podido encontrar la concentración de lodos en un volumen considerable, debido a que nunca se ha llevado la limpieza correspondiente del mismo desde la construcción y puesta en marcha en ambos sistemas de tratamiento.

Se pudo observar que existe presencia de residuos sólidos por lo que se produce interferencias en el proceso de degradación de la materia orgánica y la eliminación de agentes patógenos.

#### **d. Impactos Causados**

En las visitas a campo se pudo captar la preocupación de los pobladores debido a los fuertes olores generados por las lagunas, los cuales son arrastrados por los fuertes vientos hacia la población, generando enfermedades gastrointestinales y respiratorias. Así también existe descontento de la población urbana por la descarga de las aguas residuales supuestamente tratadas por lagunas de estabilización, sobre todo por el efluente del sistema de tratamiento N° 02, el cual se ubica aguas arriba del pozo de

captación de agua para consumo humano de la misma población urbana de la localidad de Taraco.

### 4.3.2 Registro histórico y evaluación de datos en campo

#### a. Características generales

Observaciones propias de laguna, se realizaron en un nivel de control básico, mediante visitas de campo, los cuales se presentan en la Tabla 30.

**Tabla 30:**

#### **Características generales de los sistemas de tratamientos**

<b>Características</b>	<b>Sistema de tratamiento N° 01</b>	<b>Sistema de tratamiento N° 02</b>
Apariencia y color	Laguna primaria: Se pudo apreciar un color ligeramente gris ligero en el afluente y color verde oscuro en el efluente.	Laguna primaria: gris ligero en el afluente y color verde oscuro en el efluente. Laguna secundaria: Color gris o café oscuro en el afluente es señal de una laguna sobrecargada y/o períodos de retención muy cortos, con lo cual no se alcanza la estabilización de la materia orgánica.
Natas y lodos	Se pudo apreciar la presencia de natas y lodos (material extraño, basura) en gran cantidad, en los bordes de las lagunas.	Se pudo apreciar la presencia de natas y lodos sobre todo en la laguna primaria, debido a que no cuenta con cerco perimétrico.
Olor	Olor fuertemente desagradable.	Olor fuertemente desagradable.

... Continuación

Características	Sistema de tratamiento N° 01	Sistema de tratamiento N° 02
Estado de diques	Los diques se encuentran en mal estado ya que hay presencia de crecimiento de vegetación y que los taludes han sufrido deslizamientos hacia el interior de la laguna.	La laguna primaria está en una situación crítica ya que en sus diques se logró visualizar presencia de vegetación considerada, mientras tanto en la laguna secundaria se observó en una cantidad mínima.
Espesor de lodos	Existe un gran espesor de lodo, debido a que no se realizaron limpieza del mismo desde la construcción de sistema.	En la laguna primaria, existe un gran espesor de lodo, debido a que no se realizaron limpieza del mismo desde la construcción de sistema.

Fuente: Elaboración propia

#### b. Parámetros operacionales

La medición de estos parámetros se realizó in-situ y en laboratorio, con la ayuda de hojas de control en donde se anotaron los datos recolectados en los puntos de muestreo, también se verificó la fecha y hora, lugar y ubicación del punto de muestreo, estos datos fueron determinados con la ayuda de los siguientes equipos:

**Aforo de Caudal:** para la medición del caudal en los puntos de muestreo se realizó mediante el método volumétrico.

- **Termómetro portátil:** para la medición de la temperatura.
- **GPS garmin map:** el cual sirvió para determinar las coordenadas de los puntos de muestreo.

#### c. Parámetros de monitoreo

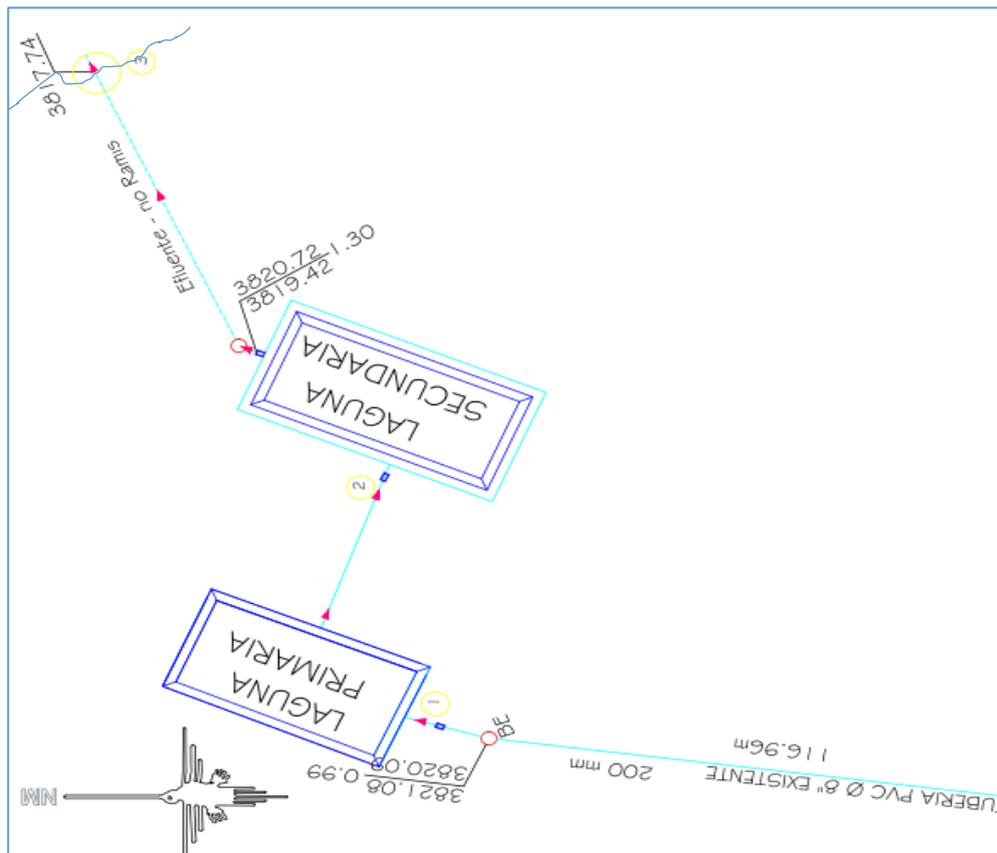
Estos parámetros se midieron en el laboratorio, previa toma de muestras en campo en puntos específicos del sistema de lagunas (afluente y efluente). Los

parámetros de más importancia son: ( $DBO_5$ , DQO, aceites y grasas, sólidos totales en suspensión, temperatura, coliformes termotolerantes), los cuales deben cumplir según la norma vigente establecida por el MINAM en el decreto supremo N° 003 – 2010. Además se analizaron parámetros adicionales determinados por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) los cuales son: Fisicoquímico (Fósforo Total, Nitratos, Nitritos, Nitrógeno amoniacal) y microbiológicos (Vibrio cholerae, Escherichia coli, Salmonella sp., Huevos de Helminthos).

### **4.3.3 Muestreo de aguas residuales en lagunas de estabilización**

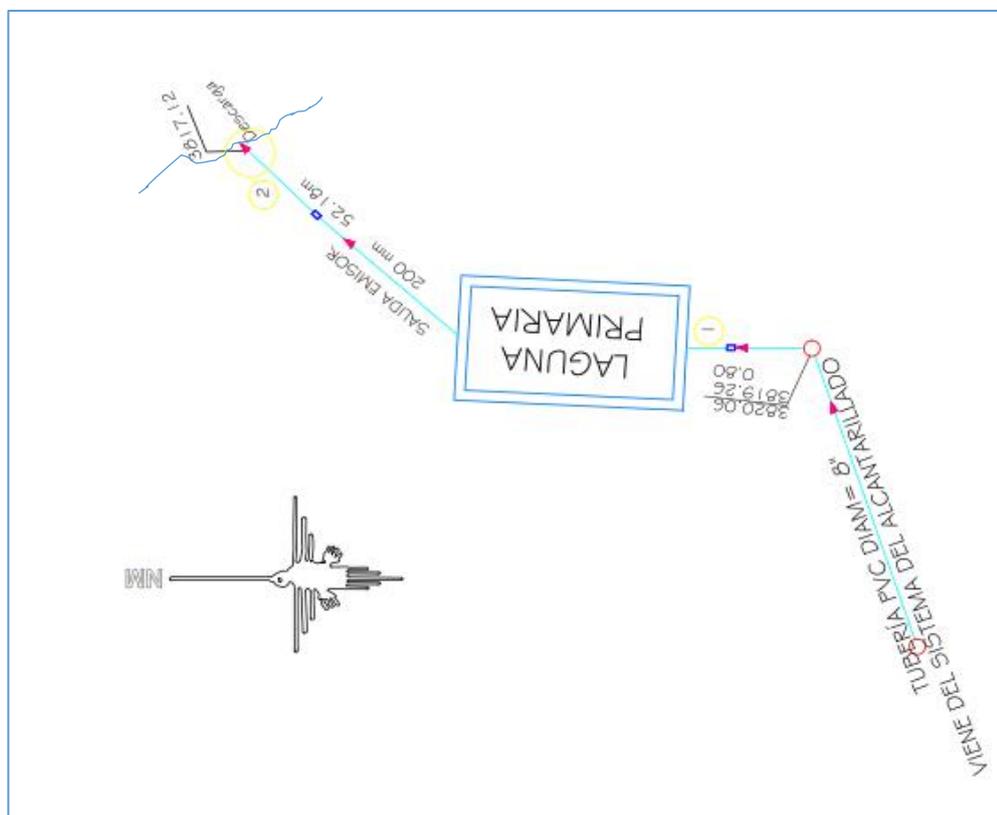
#### **a. Selección del Punto de Muestreo**

Se tuvieron puntos de muestreo más representativos elegidos estratégicamente en el ingreso como en la salida (afluente y efluente) de cada laguna y de cada uno de los sistemas de tratamiento de agua residual existentes en la localidad del distrito de Taraco. En la Figura 33 como en la Figura 34 se muestran las representaciones de los puntos de muestreo de ambos sistemas de tratamiento existentes.



**Figura 334: Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales N° 02 - Puntos de muestreo**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 343: Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales N° 01- Puntos de muestreo**

Fuente: Elaboración propia

### **b. Tipo de muestra y frecuencia de muestreo**

La muestra tomada fue de tipo compuesta y la frecuencia fue de la siguiente manera:

- **Parámetros operacionales**, entre estos (caudal, temperatura,), la frecuencia de muestreo para estos parámetros fue paralelo al de los parámetros de monitoreo.
- **Parámetros de monitoreo**, entre estos (pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos totales en suspensión, aceites y grasas, coliformes totales, fecales, Fosforo Total, nitratos, nitritos, Nitrógeno amoniacal, Vibriocholerae, Escherichia coli, Salmonella sp., Huevos de helmintos), la frecuencia de muestreo para estos parámetros se realizó a un nivel de control básico (mensual), siendo el primer bloque en el mes de setiembre del 2016 y el segundo bloque en el mes de enero del 2017.

### **c. Análisis in-situ y de laboratorio**

Algunos parámetros medidos in-situ fueron los parámetros operacionales (temperatura y caudal del afluente - efluente).

Los parámetros medidos en laboratorio fueron los parámetros de monitoreo (temperatura, pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos totales en suspensión, aceites y grasas, coliformes totales, fecales, Fosforo Total, nitratos, nitritos, Nitrógeno amoniacal, Vibriocholerae, Escherichia coli, Salmonella sp., Huevos de helmintos) los cuales guardan relación con los contaminantes potenciales que pueden afectar el cuerpo receptor.

### **d. Preservación y traslado de muestras**

Para la preservación de muestras se utilizó envases de vidrio de 300 ml y de ½ litro, mas no se agregaron reactivos solo técnicas de congelación de acuerdo a las normas que establecen para el análisis físico, químico y bacteriológico, en las que se

consideran como parámetros representativos para la determinación de la calidad de los efluentes.

#### 4.3.4 Procesamiento y análisis de parámetros analizados

##### a. Procesamiento estadístico de datos obtenidos

Los datos obtenidos en campo y laboratorio sobre los diferentes parámetros analizados se calcularon en forma periódica, los valores de máximo, mínimo, promedio y desviación estándar. Se representó gráficamente los resultados de cada medición con respecto al tiempo.

##### b. Comportamiento hidráulico

###### - Características físicas, extensión superficial, volumetría y periodo de retención.

En la Tabla 31 y Tabla 32, se muestran las características físicas y el área superficial total de cada una de las lagunas y del sistema de tratamiento en general, considerando el tirante promedio se obtuvo la capacidad de cada laguna y del sistema en general, además se expone el factor de forma producto de la relación largo y ancho de las lagunas del sistema de tratamiento, el volumen y el período de retención teórico de cada laguna de estabilización. Por otro lado, en la Figura 35 se muestra un esquema de las dimensiones de una laguna de estabilización.

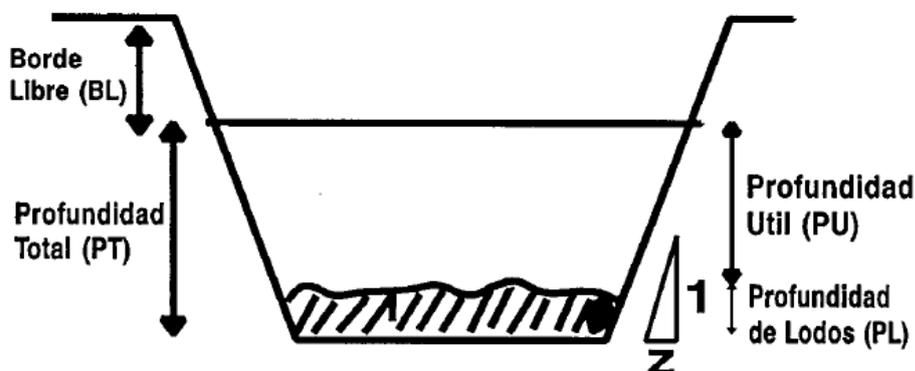


Figura 35. Dimensiones de una laguna de estabilización

Fuente: Guevara (1996)

**Tabla 31:**

**Características físicas de las lagunas de estabilización**

LAGUNA	Dimensiones de espejo de agua (m)		Dimensiones de la base (m)		PT (m)	PU (m)	PL (m)	BL (m)	z
	Largo	Ancho	Largo	Ancho					
<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 01</b>									
Primaria	32.00	16.80	28.20	13.00	3.50	0.60	2.90	1.00	1.30
<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 02</b>									
Primaria	36.80	17.60	32.89	13.69	3.20	0.75	2.45	1.10	2.20
Secundaria	40.00	16.80	35.58	12.38	3.8	1.00	2.80	1.30	1.75

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 32:**

**Extensión superficial, periodo de retención y factor de forma de las lagunas**

LAGUNA	Área Superficial (m <sup>2</sup> )	Área base (m <sup>2</sup> )	Profundidad Útil (m)	Volúmen (m <sup>3</sup> )	Periodo de Retención	Factor de Forma
<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 01</b>						
Primaria	537.60	366.60	0.60	271.26	7.18	1.90
<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 02</b>						
Primaria	647.68	450.26	0.75	337.93	7.85	2.09
Secundaria	672.00	440.48	1.00	450.58	10.47	2.38
En el Sistema	1319.68	890.47		788.51	18.32	

Fuente: Elaboración propia

**- Periodo de retención:**

El periodo de retención hidráulica de las lagunas se calculó en función del volumen actual de la laguna y el caudal de aguas residuales que ingresa a la PTAR, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo de retención} = \frac{\text{Volumen de la laguna}(m^3)}{\text{Caudal de ingreso}(m^3 / \text{dia})} \dots\dots\dots 4.1$$

Es importante recalcar el periodo de retención el cual es fundamental en la reducción de cargas orgánicas y patógenas, se recomienda que debe ser mayor a 10 días para garantizar una remoción del 99.99% de parásitos. Según la OS .090 (Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales) el periodo de retención mínimo es de 10 días como mínimo. En el cuadro se observa periodos de retención de 7.18 días, lo que indica que existe un regular reducción de cargas orgánicas y patógenas en el primer caso (sistema de tratamiento N° 01) y buena en el sistema de tratamiento N° 02.

**- Aporte, distribución y variación de caudales**

En la Tabla 33, 34, 35 y 36, se observan los caudales máximos, mínimos y promedios que ingresan y egresan en los sistemas de tratamiento tomados en el tiempo de evaluación. Además se observa la medición del parámetro de la temperatura siendo el intervalo de tiempo de cada una hora en los puntos de muestreo.

**Tabla 33:**

**Medición de caudal y temperatura en el sistema de tratamiento de agua residuales  
N° 01 - Afluente**

AFORO DE CAUDAL - MÉTODO VOLUMÉTRICO									
SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 01 - AFLUENTE									
FECHA:			20/09/2016			30/01/2017			PROMEDIO CAUDAL (L/S)
N°	HORA	V (L)	T (S)	Q (L/S)	T° A.R. °C	T (S)	Q (L/S)	T° A.R. °C	
1	06:00	1.00	2.50	0.40	10.40	1.87	0.53	12.00	0.47
2	07:00	1.00	1.98	0.51	10.50	1.82	0.55	14.00	0.53
3	08:00	1.00	1.79	0.56	11.00	1.68	0.60	15.00	0.58
4	09:00	1.00	2.13	0.47	11.50	1.70	0.59	15.50	0.53
5	10:00	1.00	2.25	0.44	12.00	1.74	0.57	16.00	0.51
6	11:00	1.00	4.01	0.25	13.00	1.98	0.51	14.00	0.38
7	12:00	1.00	4.50	0.22	12.80	2.30	0.43	15.00	0.33
8	13:00	1.00	4.10	0.24	12.50	2.45	0.41	16.00	0.33
9	14:00	1.00	3.20	0.31	14.50	3.12	0.32	15.50	0.32
10	15:00	1.00	2.32	0.43	14.00	2.50	0.40	15.20	0.42
11	16:00	1.00	2.13	0.47	13.00	2.45	0.41	15.50	0.44
12	17:00	1.00	2.10	0.48	13.50	2.48	0.40	15.00	0.44
13	18:00	1.00	2.19	0.46	13.50	2.49	0.40	15.00	0.43
<b>PROMEDIO=</b>				<b><u>0.40</u></b>	<b><u>12.48</u></b>	-	<b><u>0.47</u></b>	<b><u>14.90</u></b>	<b><u>0.44</u></b>
<b>MÁXIMO=</b>				<b><u>0.56</u></b>	<b><u>14.50</u></b>		<b><u>0.60</u></b>	<b><u>16.00</u></b>	<b><u>0.58</u></b>
<b>MÍNIMO=</b>				<b><u>0.22</u></b>	<b><u>10.40</u></b>		<b><u>0.32</u></b>	<b><u>12.00</u></b>	<b><u>0.32</u></b>

Fuente: elaboración propia

**Tabla 34:**

**Medición de caudal y temperatura en el sistema de tratamiento de agua residuales  
N° 01 – Efluente**

AFORO DE CAUDAL - MÉTODO VOLUMÉTRICO									
SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 01 - EFLUENTE									
FECHA:			20/09/2016			30/01/2017			PROMEDIO CAUDAL (L/S)
N°	HORA	V (L)	T (S)	Q (L/S)	T° A.R. °C	T (S)	Q (L/S)	T° A.R. °C	
1	06:00	0.50	1.25	0.40	10.5	1.14	0.44	10.50	0.42
2	07:00	0.50	1.12	0.45	10.6	0.97	0.52	13.80	0.48
3	08:00	0.50	1.10	0.45	10.5	0.87	0.57	14.50	0.51
4	09:00	0.50	1.08	0.46	10.0	0.90	0.56	14.80	0.51
5	10:00	0.50	1.15	0.43	10.5	0.92	0.54	15.00	0.49
6	11:00	0.50	1.52	0.33	10.5	1.23	0.41	13.50	0.37
7	12:00	0.50	1.60	0.31	11.8	1.50	0.33	14.00	0.32
8	13:00	0.50	1.63	0.31	11.0	1.56	0.32	15.00	0.31
9	14:00	0.50	1.65	0.30	12.5	1.60	0.31	14.50	0.31
10	15:00	0.50	1.37	0.36	12.8	1.27	0.39	15.00	0.38
11	16:00	0.50	1.21	0.41	12.0	1.26	0.40	15.50	0.41
12	17:00	0.50	1.25	0.40	12.4	1.15	0.43	14.80	0.42
13	18:00	0.50	1.27	0.39	11.5	1.23	0.41	14.00	0.40
<b>PROMEDIO=</b>				<b><u>0.39</u></b>	<b><u>11.28</u></b>	-	<b><u>0.43</u></b>	<b><u>14.22</u></b>	<b><u>0.41</u></b>
<b>MÁXIMO=</b>				<b><u>0.46</u></b>	<b><u>12.80</u></b>		<b><u>0.57</u></b>	<b><u>15.50</u></b>	<b><u>0.51</u></b>
<b>MÍNIMO=</b>				<b><u>0.30</u></b>	<b><u>10.00</u></b>		<b><u>0.31</u></b>	<b><u>10.50</u></b>	<b><u>0.31</u></b>

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 35:**

**Medición de caudal y temperatura en el sistema de tratamiento de agua residuales**

**N° 02 – Afluente**

AFORO DE CAUDAL - MÉTODO VOLUMÉTRICO									
SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 02 - AFLUENTE									
FECHA:			20/09/2016			30/01/2017			PROMEDIO CAUDAL (L/S)
N°	HORA	V (L)	T (S)	Q (L/S)	T° A.R. °C	V (L)	T (S)	Q (L/S)	
1	06:00	0.50	1.15	0.43	13.90	1.20	0.42	14.0	0.43
2	07:00	0.50	0.94	0.53	14.00	0.92	0.54	14.5	0.54
3	08:00	0.50	1.13	0.44	13.90	0.95	0.53	15.0	0.48
4	09:00	0.50	1.37	0.36	15.00	1.02	0.49	14.8	0.43
5	10:00	0.50	1.50	0.33	15.00	1.28	0.39	15.5	0.36
6	11:00	0.50	1.12	0.45	14.50	1.43	0.35	16.0	0.40
7	12:00	0.50	0.98	0.51	15.00	1.54	0.32	16.0	0.42
8	13:00	0.50	0.84	0.60	15.20	1.89	0.26	16.5	0.43
9	14:00	0.50	0.50	1.00	16.00	1.30	0.38	16.0	0.69
10	15:00	0.50	0.51	0.98	15.50	0.98	0.51	16.5	0.75
11	16:00	0.50	0.68	0.74	14.80	1.25	0.40	16.0	0.57
12	17:00	0.50	0.78	0.64	12.00	1.26	0.40	14.5	0.52
13	18:00	0.50	0.90	0.56	13.00	1.35	0.37	15.0	0.46
<b>PROMEDIO=</b>				<b><u>0.58</u></b>	<b><u>14.45</u></b>	-	<b><u>0.41</u></b>	<b><u>15.41</u></b>	<b><u>0.50</u></b>
<b>MÁXIMO=</b>				<b><u>1.00</u></b>	<b><u>16.00</u></b>	-	<b><u>0.54</u></b>	<b><u>16.50</u></b>	<b><u>0.75</u></b>
<b>MÍNIMO=</b>				<b><u>0.33</u></b>	<b><u>12.00</u></b>	-	<b><u>0.26</u></b>	<b><u>14.00</u></b>	<b><u>0.36</u></b>

**Fuente:** elaboración propia

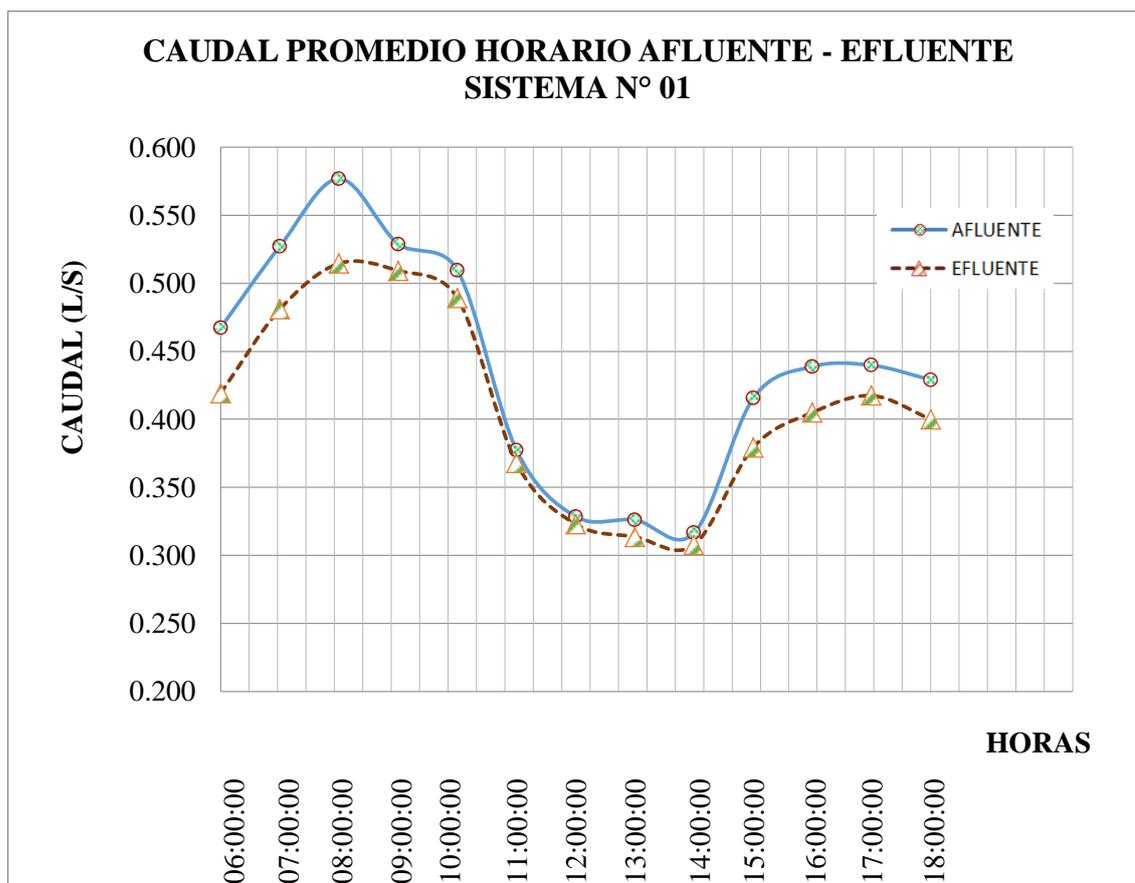
**Tabla 36:**

**Medición de caudal y temperatura en el sistema de tratamiento de agua residuales  
N° 02 – Efluente**

<b>AFORO DE CAUDAL - MÉTODO VOLUMÉTRICO</b>									
<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 02 - EFLUENTE</b>									
<b>FECHA:</b>			<b>20/09/2016</b>			<b>30/01/2017</b>			<b>PROMEDIO CAUDAL (L/S)</b>
<b>N°</b>	<b>HORA</b>	<b>V (L)</b>	<b>T (S)</b>	<b>Q (L/S)</b>	<b>T° A.R. °C</b>	<b>V (L)</b>	<b>T (S)</b>	<b>T° A.R. °C</b>	
1	06:00	0.50	1.47	0.34	10.00	1.30	0.38	13.00	0.36
2	07:00	0.50	1.18	0.42	11.00	1.20	0.42	13.50	0.42
3	08:00	0.50	1.19	0.42	11.20	1.02	0.49	13.80	0.46
4	09:00	0.50	1.45	0.34	11.30	1.10	0.45	14.00	0.40
5	10:00	0.50	1.53	0.33	12.00	1.33	0.38	14.20	0.35
6	11:00	0.50	1.20	0.42	11.50	1.48	0.34	15.00	0.38
7	12:00	0.50	1.05	0.48	12.00	1.61	0.31	15.00	0.39
8	13:00	0.50	0.89	0.56	12.50	2.03	0.25	16.50	0.40
9	14:00	0.50	0.52	0.96	13.20	1.45	0.34	15.00	0.65
10	15:00	0.50	0.53	0.94	13.00	1.24	0.40	14.00	0.67
11	16:00	0.50	0.73	0.68	13.50	1.32	0.38	14.00	0.53
12	17:00	0.50	0.85	0.59	12.00	1.33	0.38	14.50	0.48
13	18:00	0.50	1.05	0.48	11.60	1.41	0.35	14.00	0.42
<b>PROMEDIO=</b>				<b><u>0.54</u></b>	<b><u>11.91</u></b>	-	<b><u>0.37</u></b>	<b><u>14.35</u></b>	<b><u>0.46</u></b>
<b>MÁXIMO=</b>				<b><u>0.96</u></b>	<b><u>13.50</u></b>		<b><u>0.49</u></b>	<b><u>16.50</u></b>	<b><u>0.67</u></b>
<b>MÍNIMO=</b>				<b><u>0.33</u></b>	<b><u>10.00</u></b>		<b><u>0.25</u></b>	<b><u>13.00</u></b>	<b><u>0.35</u></b>

**Fuente:** elaboración propia

En la Figura 36 como en la Figura 37, se muestran las variaciones del caudal promedio horario por día de entrada y salida del sistema de lagunas, teniendo las horas pico de mayor consumo de agua potable a las 7.00am - 10.00am en el sistema de tratamiento N° 01 y 7:00am- 8:00am y de 2:00pm -3:00pm en el sistema de tratamiento N° 02 respectivamente.



**Figura 36. Variación de caudal promedio horario en el Sistema de tratamiento N° 01**

Fuente: Elaboración propia

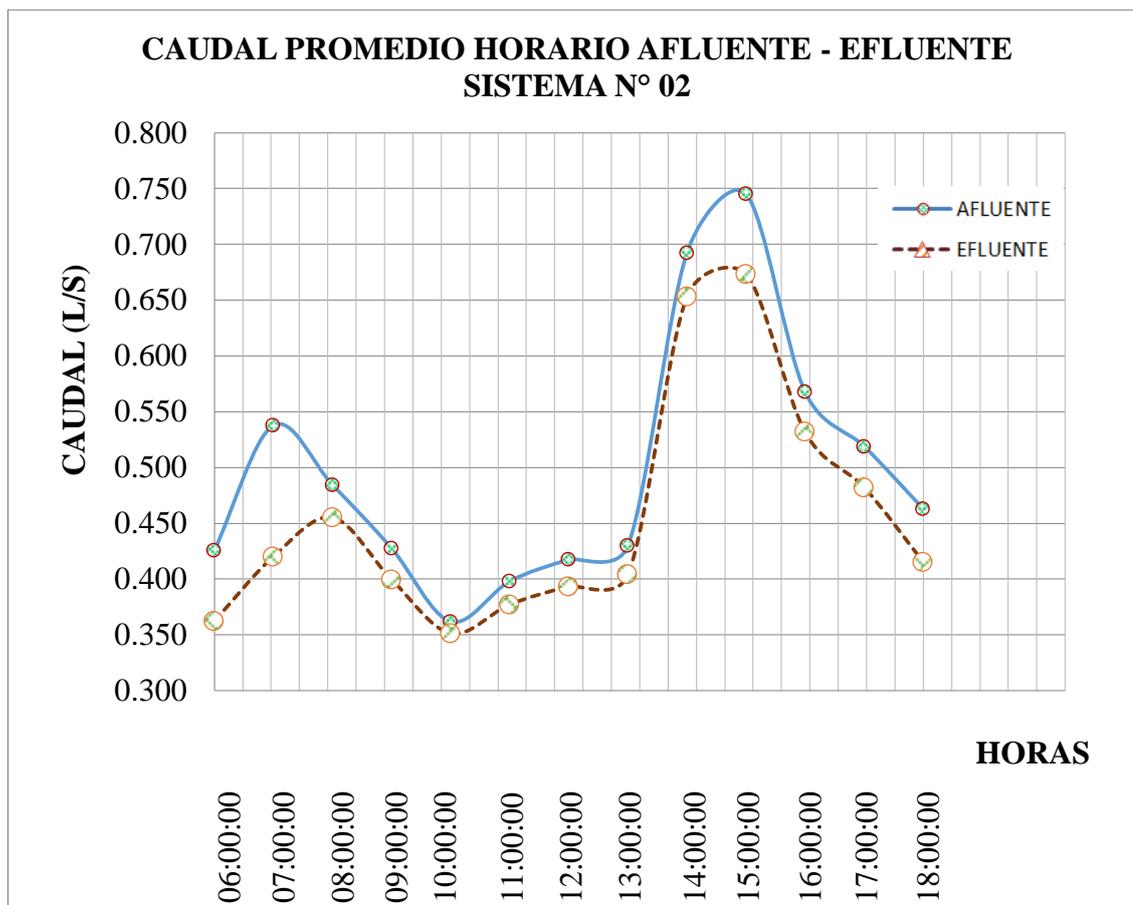


Figura 37. Variación de caudal promedio horario - Sistema de tratamiento N° 02

Fuente: Elaboración propia

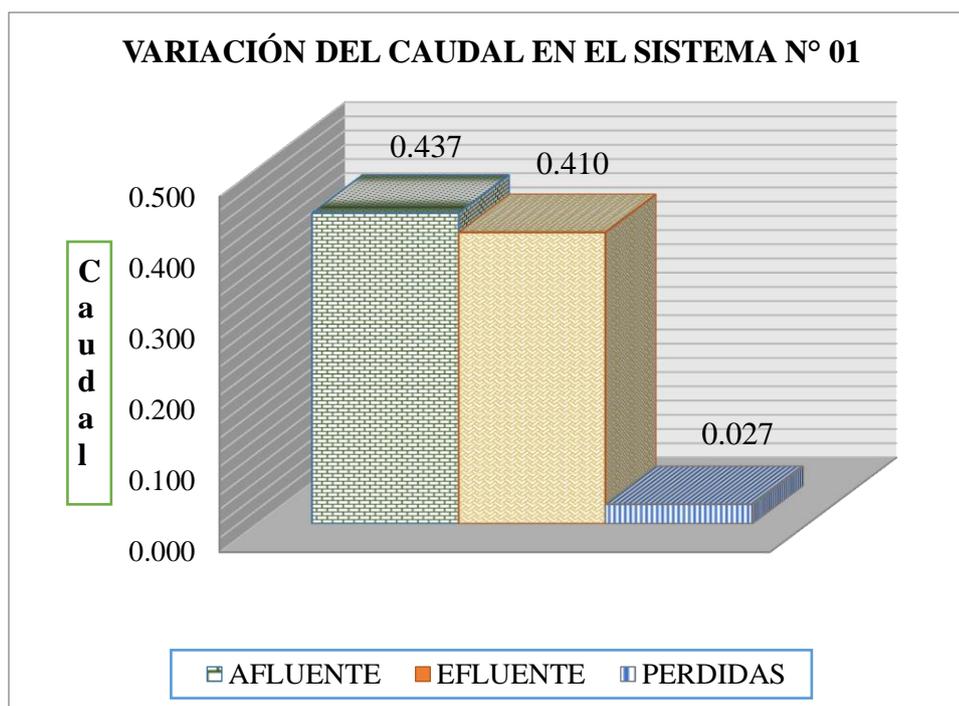
**- Balance hidráulico en el sistema**

Los resultados obtenidos a través del balance hidráulico indican pérdidas de 0.027 l/s y 0.042 l/s en los sistemas de tratamiento N° 01 y 02 respectivamente considerando que la precipitación pluvial no tuvo incidencias durante el periodo de evaluación, se deduce que la evaporación combinada con la infiltración generan las pérdidas de caudal en el sistema, sobre todo hay presencia de filtración en las lagunas primarias de ambos sistemas.

Cabe mencionar que las lagunas de estabilización que no han logrado cumplir su objetivo ha sido por causa de un balance hídrico inadecuado ya que son pocas las

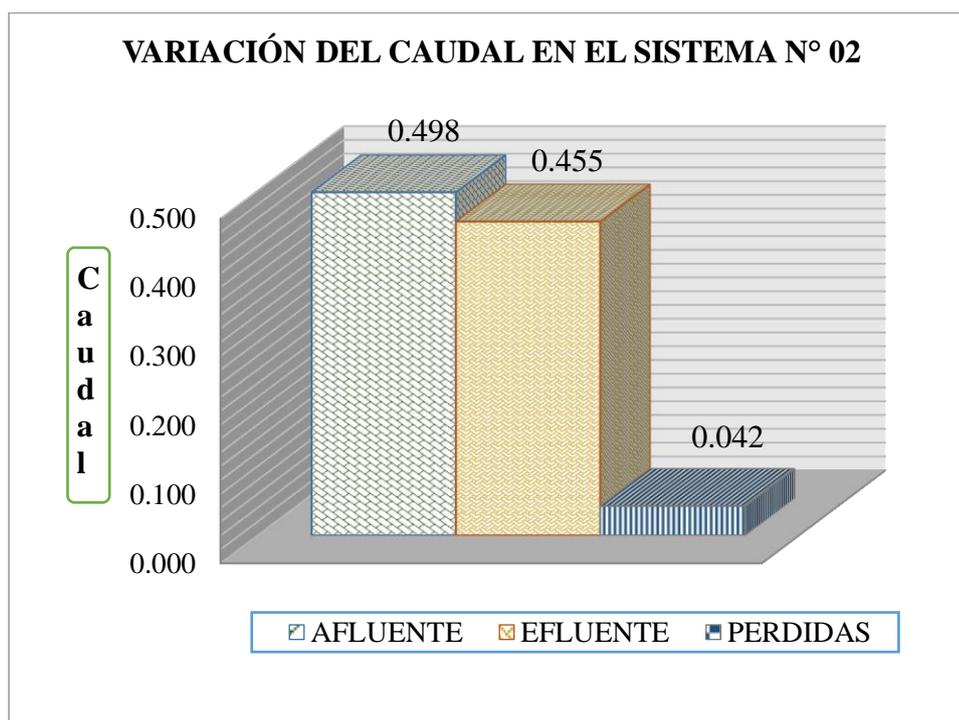
lagunas que han fallado por aplicarle una carga orgánica mal calculada, puesto que el diseño por carga orgánica es más flexible que por balance hídrico.

La Figura 38 y la Figura 39, muestran la variación de caudal en el sistema de lagunas, así también las pérdidas de caudal en L/s. ocasionadas por la evaporación combinada con la infiltración.



**Figura 38. Variación de caudal promedio en el sistema de tratamiento N° 01**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 39. Variación de caudal promedio en el sistema de tratamiento N° 02**

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.5 Calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua residual.

La calidad física-química y bacteriológica del agua residual de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de la localidad del distrito de Taraco se enmarca en los resultados obtenidos sobre las características y concentraciones de los parámetros evaluados tanto in-situ, como en el laboratorio (ver Tabla 37).

##### a) Parámetros evaluados en campo (físicos)

**Olor:** Es causado por los sólidos flotantes y gruesos que ayudan a formación de natas que producen malos olores, característico de una laguna sobrecargada de sedimentos debido a que el sistema no cuenta con tratamiento preliminar.

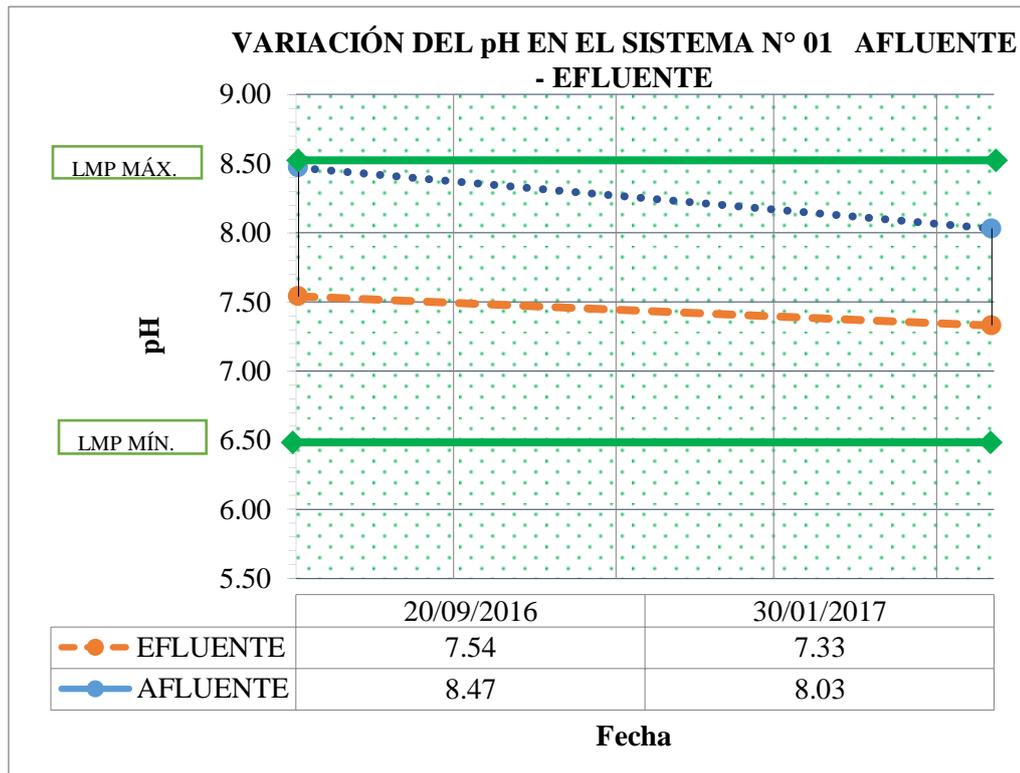
**Color y sabor:** Se determinó en el mismo lugar donde se recogió la muestra de la planta de tratamiento, que normalmente es desagradable en apariencia y en extremo peligroso, esto por el contenido de organismos patógenos, y el color indica el

contenido de micro organismos. El color de ingreso al sistema de tratamiento es gris ligero en ambos sistemas y en la salida es verdoso en el sistema de tratamiento N° 01 y color café oscuro en el afluente del sistema de tratamiento N° 02.

**Temperatura:** Se determinó en el campo, obteniendo un valor promedio de ingreso al sistema de 12.48 °C y con una salida de 11.28 °C (Sistema de tratamiento N° 01 – época sequía), 14.90 °C valor promedio de ingreso al sistema y con una salida de 14.22 °C (Sistema de tratamiento N° 01 – época lluviosa), y un valor de ingreso al sistema de 14.45 °C y con una salida de 11.91 °C (Sistema de tratamiento N° 02 – época sequía), 15.41 °C valor de ingreso al sistema y con una salida de 14.35 °C (Sistema de tratamiento N° 02 – época lluviosa), esto significa que no causa efectos negativos sobre la vida del micro organismo que intervienen en la eficiencia del sistema de tratamiento, ya que este parámetro es muy importante en comportamiento de ciertos parámetros del agua, tales como, la solubilidad de las sales y gases, en la conductividad eléctrica, sobre el pH y así como en el metabolismo bacteriano.

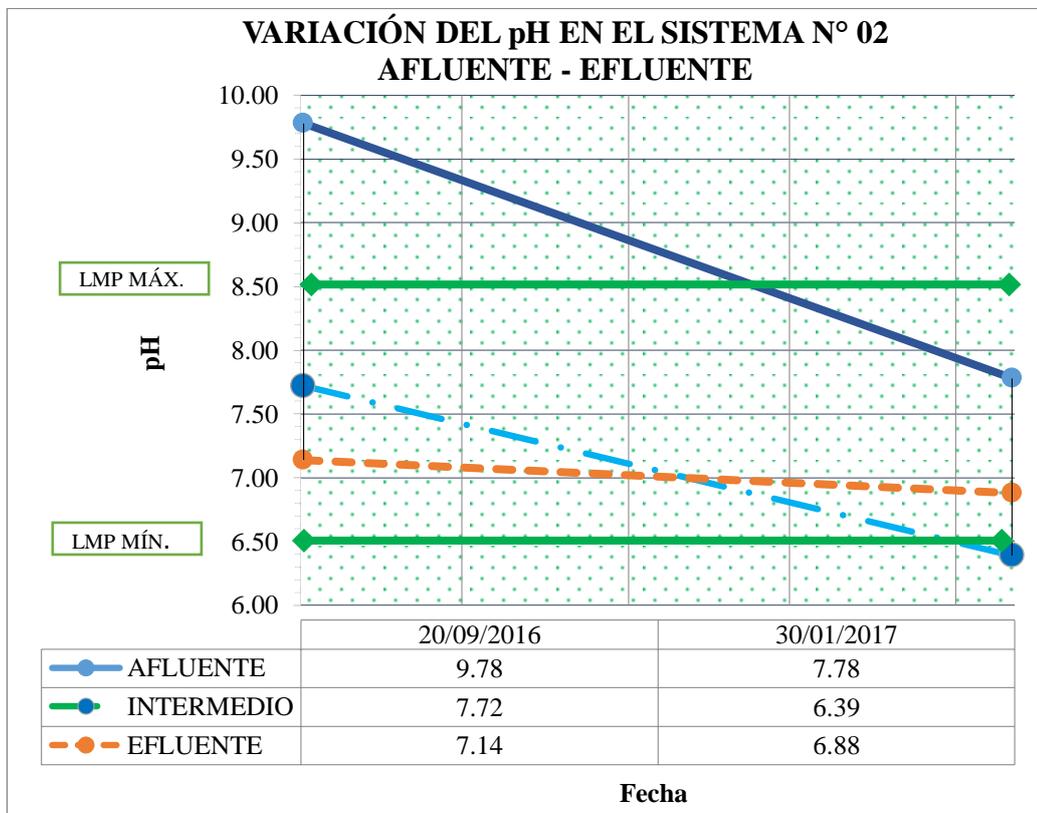
#### b) Parámetros evaluados en laboratorio – físico

**pH:** Se midió con el laboratorio, obteniendo valores independientes para cada punto de muestreo, cuyos resultados en algunos puntos sobrepasan los Límites Máximos Permisibles (ver Tabla 37, Figura 40 y Figura 41). En promedio los resultados de los muestreos se mantienen dentro de los rangos considerados en los LMP es decir se ubican dentro de 6.5 – 8.5. Este parámetro mide la acidez, la alcalinidad del agua y favorece en la proliferación y desarrollo de los organismos acuáticos.



**Figura 40. Variación de pH en el sistema de tratamiento N° 01**

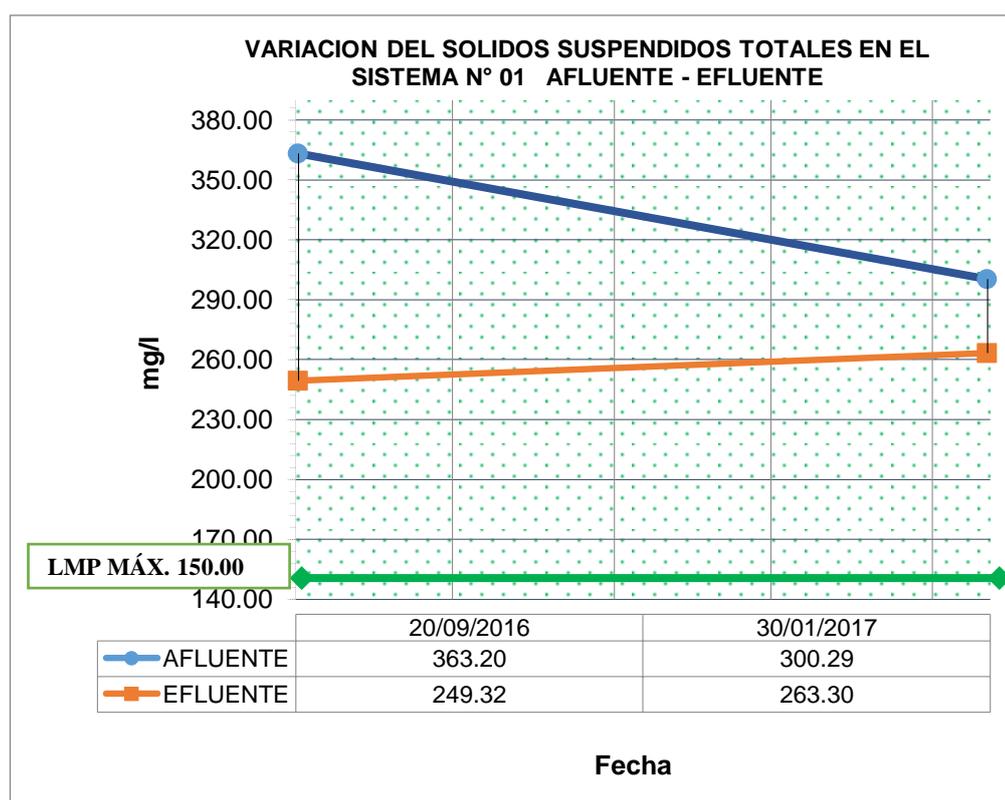
Fuente: Elaboración propia



**Figura 41. Variación de pH en el sistema de tratamiento N° 02**

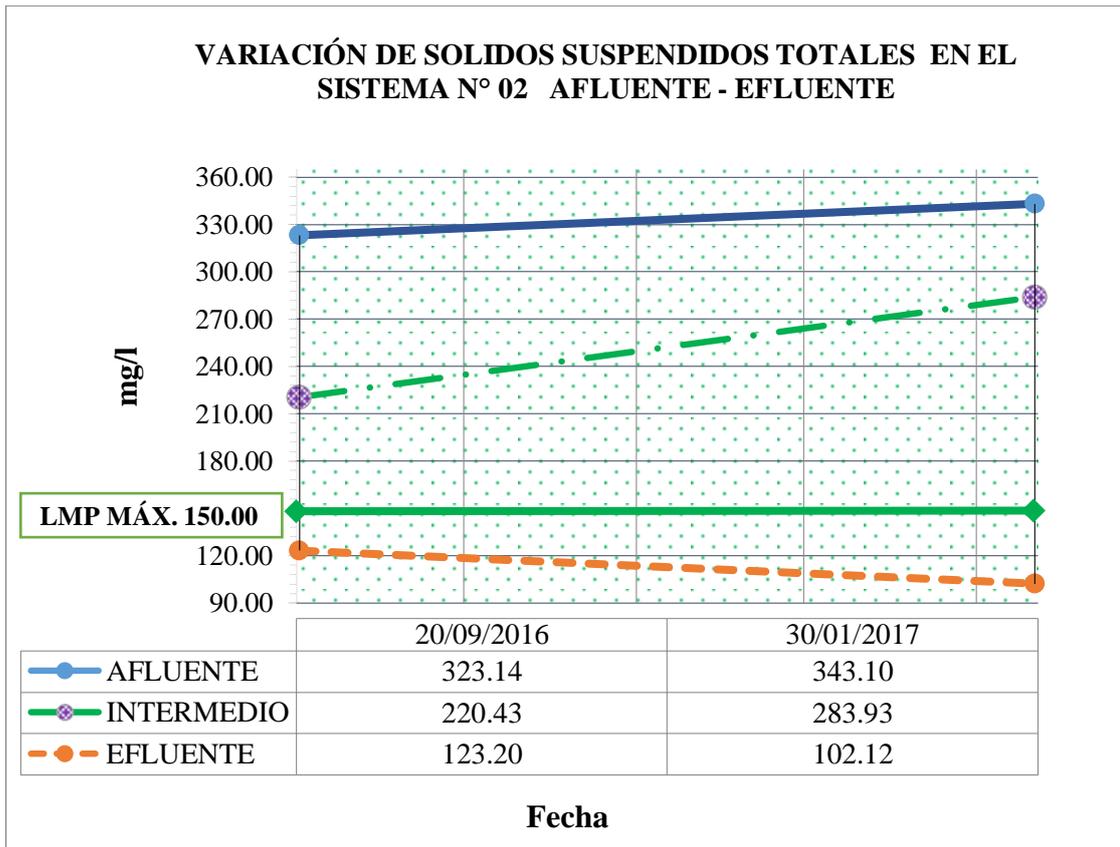
Fuente: Elaboración propia

**Sólidos suspendidos totales:** Materia que se obtiene como residuos después someterse a un proceso de evaporación y secado entre 103 y 105 °C, se determinó en el laboratorio, obteniendo un valor máximo de ingreso al sistema de tratamiento N° 01 de 363.20 mg/L. y un valor máximo de salida de 263.30 mg/L., mientras tanto en el sistema de tratamiento N° 02 se obtuvo un valor máximo de ingreso 343.10 mg/L y un valor máximo en el efluente de 123.20 mg/L (ver Tabla 37). los resultados en el efluente del sistema de tratamiento N° 01 se encuentran por encima del valor de los LMP del D.S N°003 – 2010 – MINAM, el cual es de 150 mg/L, mientras que en el sistema de tratamiento N 02 cumple con los valores de los LMP. Los resultados de los muestreos se pueden apreciar en la Figuras 42 y Figura 43.



**Figura 42. Variación de SST en el sistema de tratamiento N° 01**

Fuente: Elaboración propia

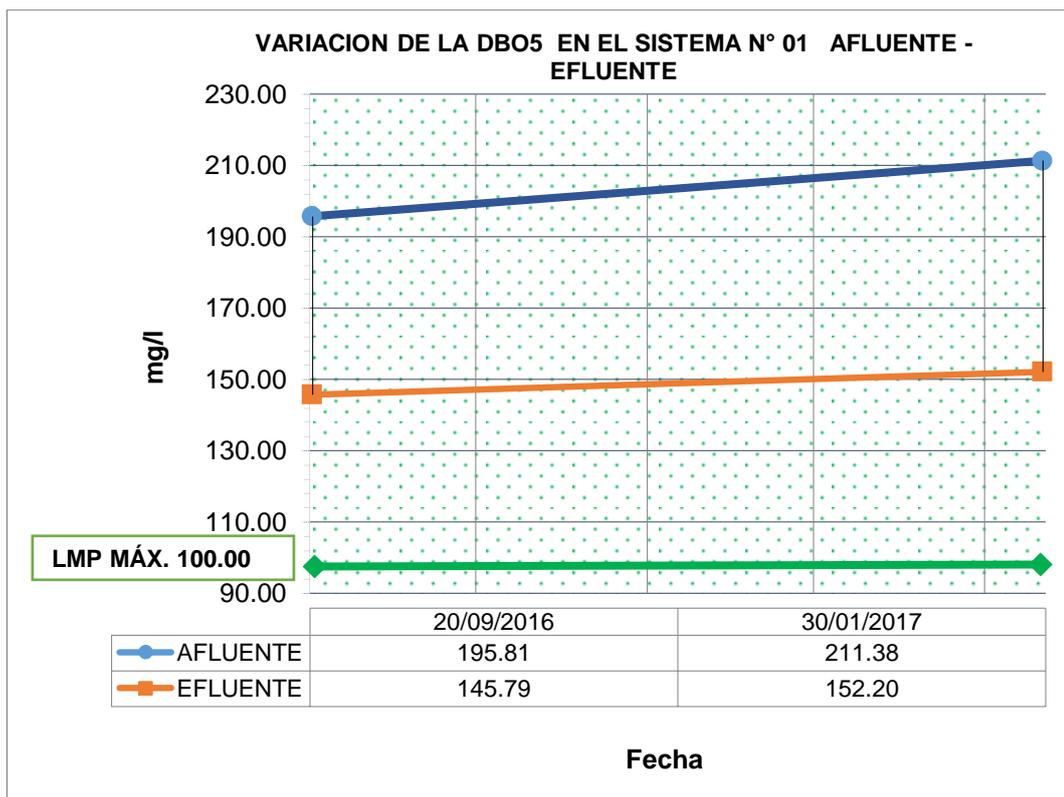


**Figura 43. Variación de SST en el sistema de tratamiento N° 02**

Fuente: Elaboración propia

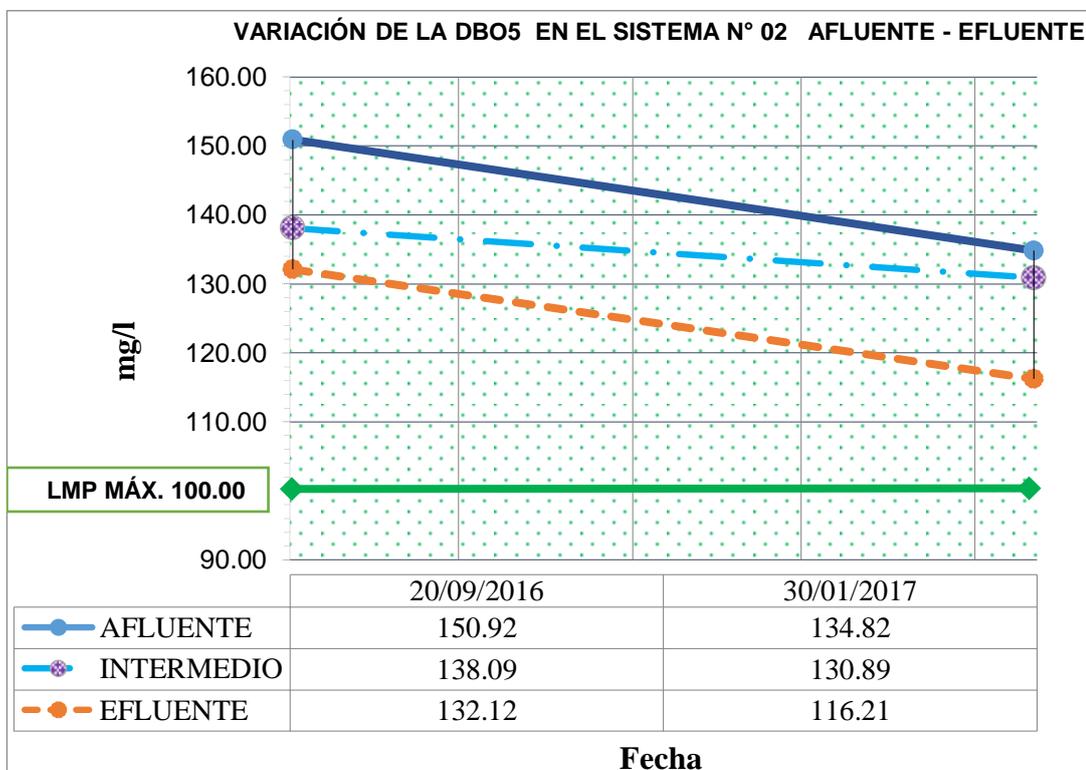
**c) Parámetros evaluados en laboratorio – Químicos**

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>):** La remoción de este parámetro es fundamental en el funcionamiento de las plantas de tratamiento, fue determinado en laboratorio, donde se obtuvo un valor máximo de ingreso al sistema de 211.38 mg/L y un valor máximo de salida del sistema de 152.20 mg/L (sistema de tratamiento N° 01), por otro lado en el sistema de tratamiento N° 02 se tuvo un valor máximo de ingreso de 150.92 mg/L y un valor máximo de salida del sistema de 132.12 mg/L (ver Tabla 37), dichos valores específicamente de los efluentes de ambos sistemas no se encuentran dentro de los LMP que viene a ser de 100 mg/l, tal como muestran la Figura 44 y la Figura 45.



**Figura 44. Variación de DBO<sub>5</sub> en el sistema de tratamiento N° 01**

Fuente: Elaboración propia

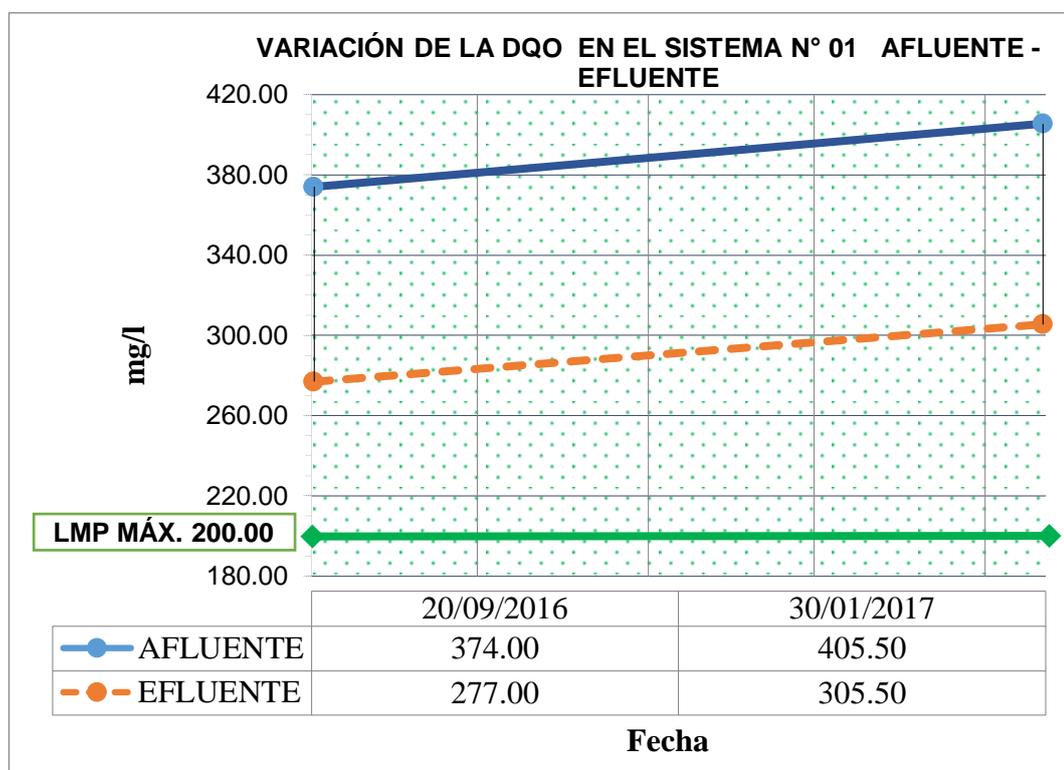


**Figura 45. Variación de DBO<sub>5</sub> en el sistema de tratamiento N° 02**

Fuente: Elaboración propia

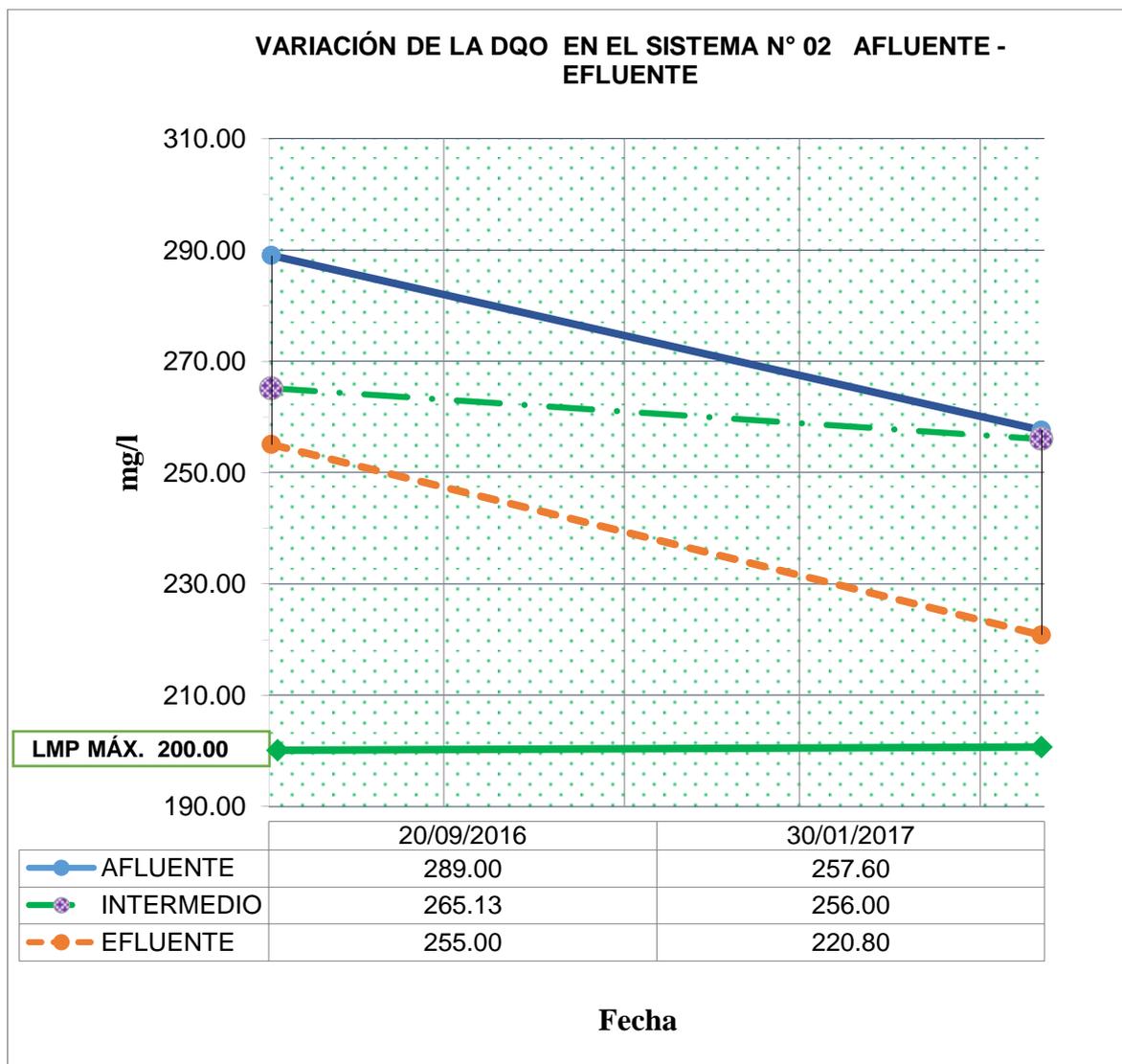
**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** La remoción de la DQO es fundamental en un sistema de tratamiento siendo una medida compleja de la contaminación química del agua, basada en la determinación de los miligramos de oxígeno (O<sub>2</sub>) consumidos por litros de muestra que se somete a un proceso de digestión, es decir se calienta a 150 °C durante dos horas en presencia de un agente oxidante fuerte.

El valor máximo de ingreso al sistema de tratamiento N° 01 es de 405.50 mg/L y el valor máximo de salida es de 305.50 mg/L, por otro lado los valores máximos de ingreso y salida en el sistema de tratamiento N° 02 son de 289.00 mg/L y 255.00 mg/L respectivamente (ver Tabla 37). Los valores de los efluentes con respecto al parámetro DQO se encuentran por encima del valor de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en el DS N° 003 – 2010 – MINAM que es de 200 mg/L tal como muestran la Figura 46 y la Figura 47.



**Figura 46. Variación de DQO en el sistema de tratamiento N° 01**

Fuente: Elaboración propia



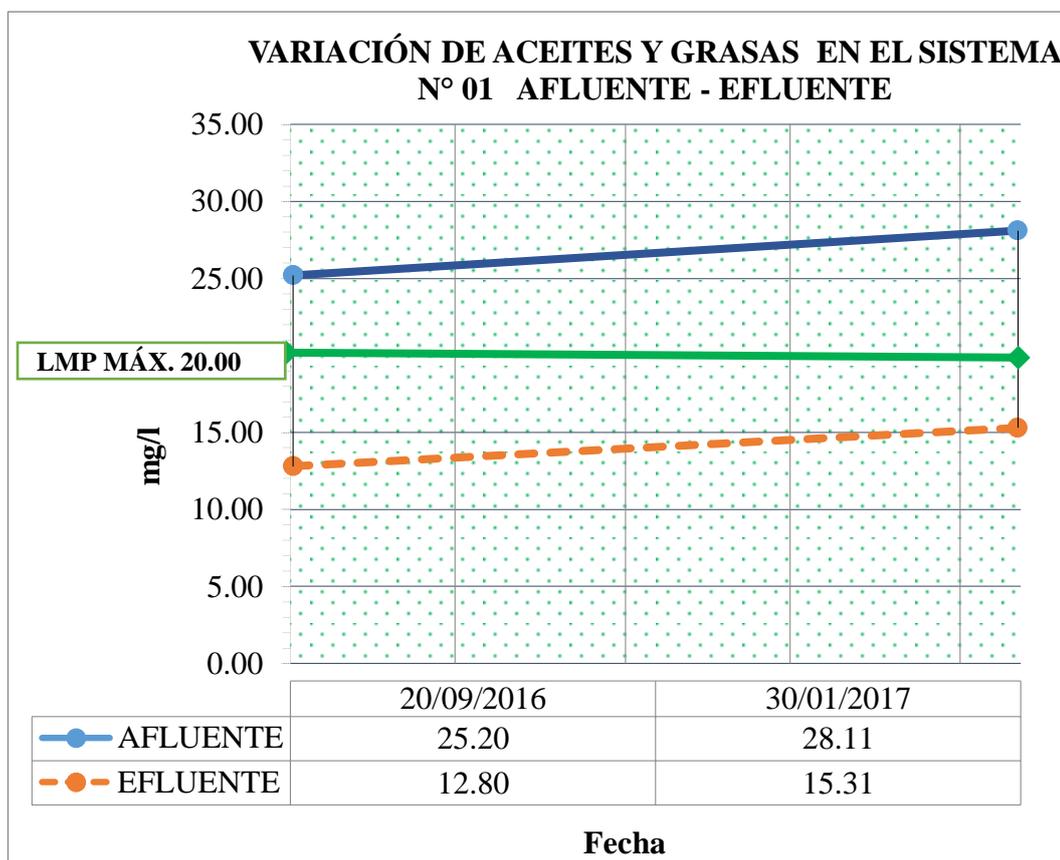
**Figura 47. Variación de DQO en el sistema de tratamiento N° 02**

Fuente: Elaboración propia

**Aceites y Grasas:** Los aceites y grasas alteran los procesos aerobios y anaerobios, forman películas que impiden el desarrollo de la fotosíntesis y cubren los fondos y lechos de ríos, degradando el ambiente durante el proceso de descomposición.

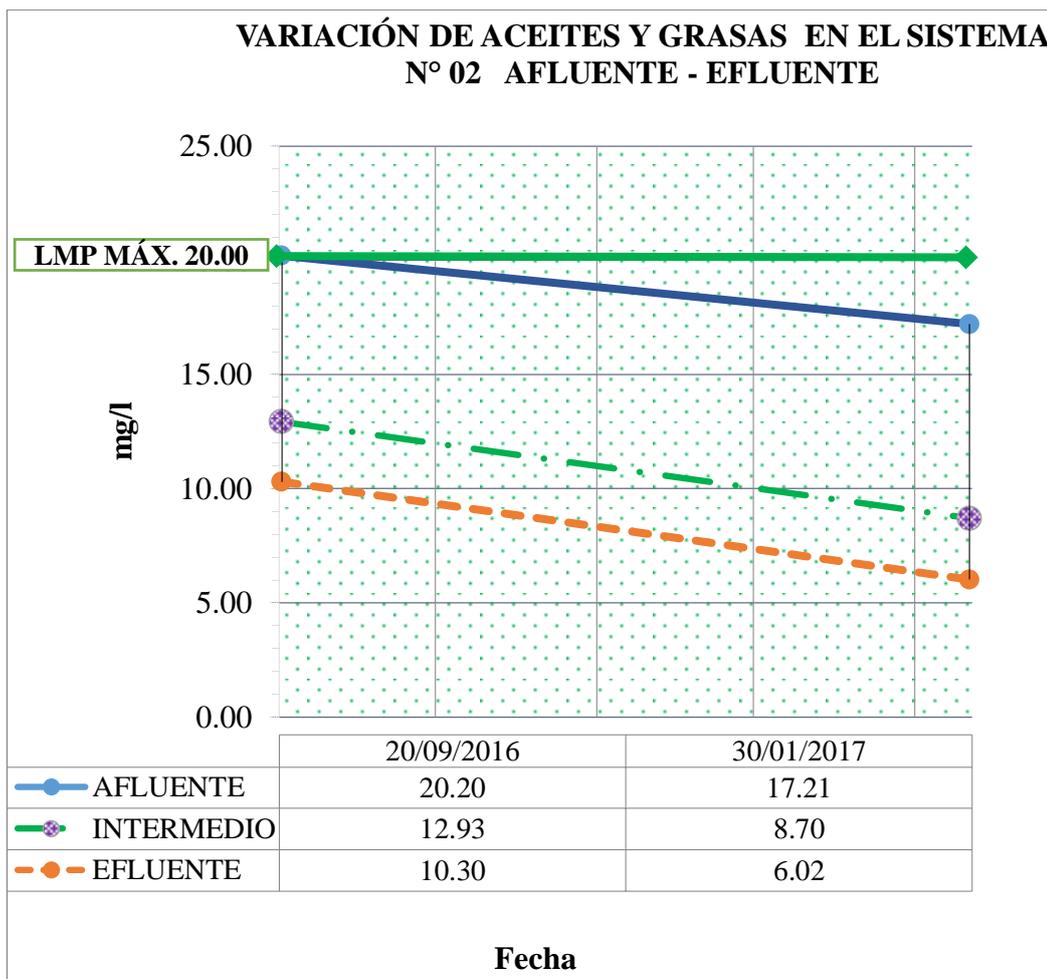
Se determinó en el laboratorio, obteniendo un valor máximo de ingreso al sistema de tratamiento N° 01 de 28.11 mg/L y un valor máximo de salida es de 15.31 mg/L, por otro lado los valores máximos de ingreso y salida en el sistema de tratamiento N° 02 fueron de 20.20 mg/L y 10.30mg/L respectivamente (ver Tabla 37).

Los resultados en los efluentes de los sistemas de tratamiento se encuentran por debajo de los LMP que es de 20 mg/L (ver Figura 48 y Figura 49). Por lo cual se deduce que no estaría alterando los procesos aerobios ni anaerobios en el cuerpo receptor, en tal sentido no estaría degradando el ambiente.



**Figura 48. Variación de grasas y aceites en el sistema de tratamiento N° 01**

Fuente: Elaboración propia



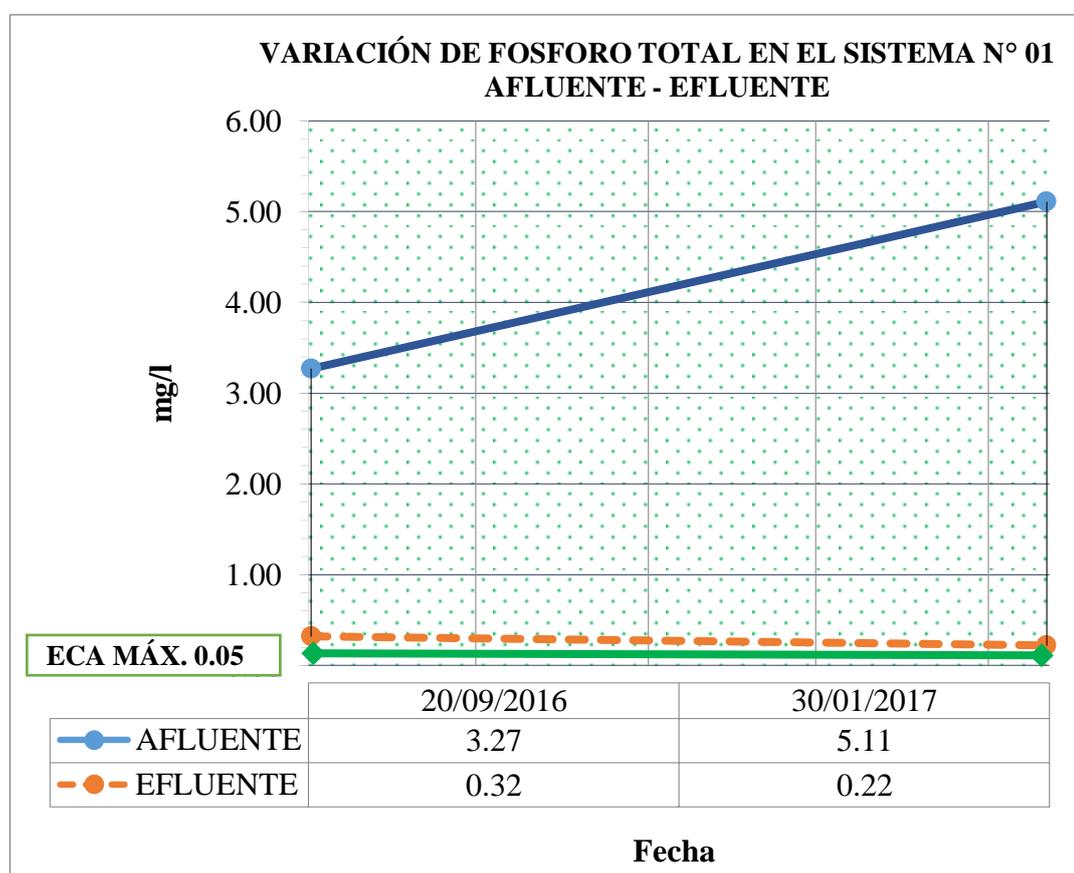
**Figura 49. Variación de grasas y aceites en el sistema de tratamiento N° 02**

Fuente: Elaboración propia

**Fosforo Total:** El fósforo, como el nitrógeno, es un elemento esencial para el crecimiento biológico. En el agua residual el fósforo se encuentra en 3 formas: ortofosfatos solubles, polifosfatos inorgánicos y fosfatos orgánicos. El ortofosfato es la forma más fácilmente asimilable por los microorganismos y se utiliza como un parámetro de control en los procesos biológicos de eliminación de fósforo y es por eso que existe marcado interés en removerlo de las aguas residuales. Los resultados del análisis de fosforo total en el sistema de tratamiento N° 01, indican que el valor máximo obtenido en el ingreso es de 5.11 mg/L. y en la salida es de 0.32 mg/L, por otro

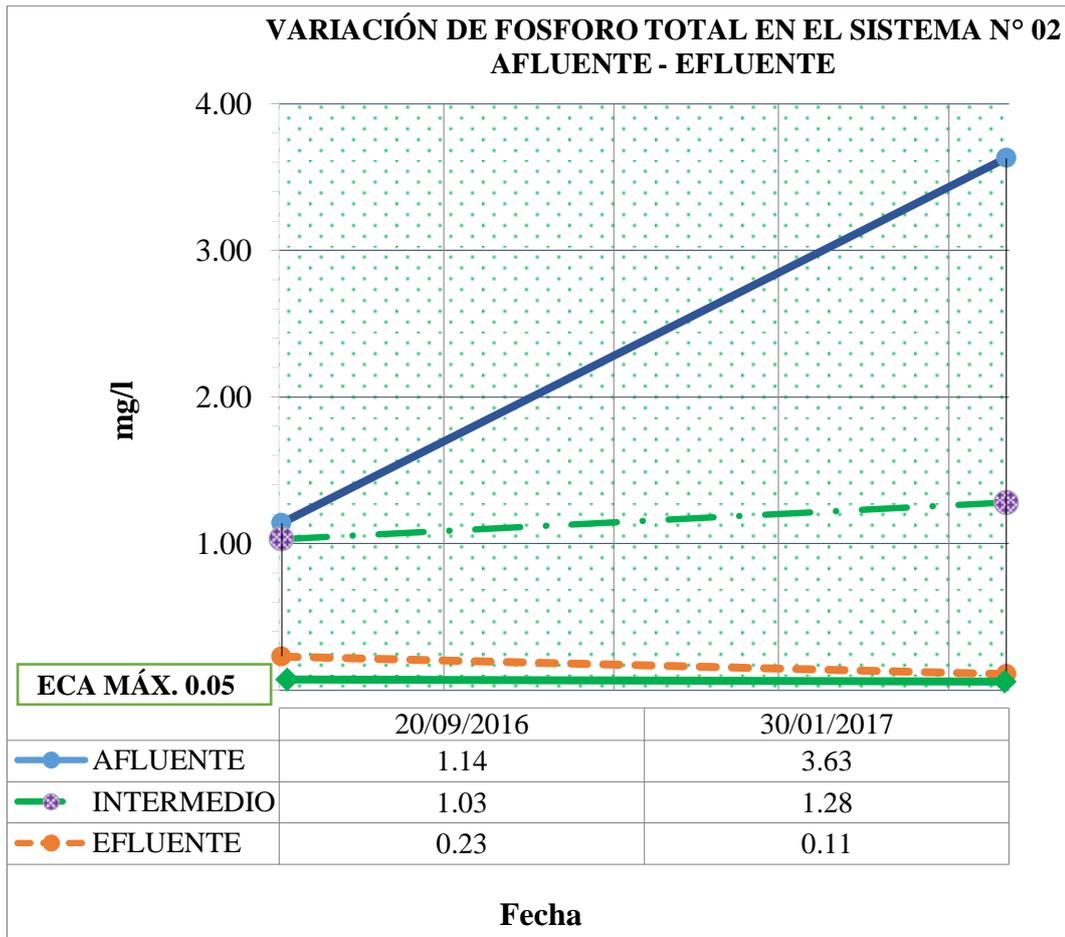
lado en el sistema de tratamiento N° 02 los resultados fueron de 3.63 mg/L en el afluente y 0.23 mg/L en el efluente que vienen a ser valores máximos (ver Tabla 37).

En los ECA en la Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, se establece que este parámetro debe ser de 0.05 mg/L como valor máximo en ríos, por lo que ambos sistemas de tratamiento sobrepasan de manera considerable, caso que es muy preocupante en el crecimiento masivo de algas, por lo que se debe realizar un estudio detallado en las aguas del cuerpo receptor. La Figura 50 y Figura 51 muestran claramente los resultados de los muestreos.



**Figura 50. Variación de fósforo total en el sistema de tratamiento N° 01**

Fuente: Elaboración propia

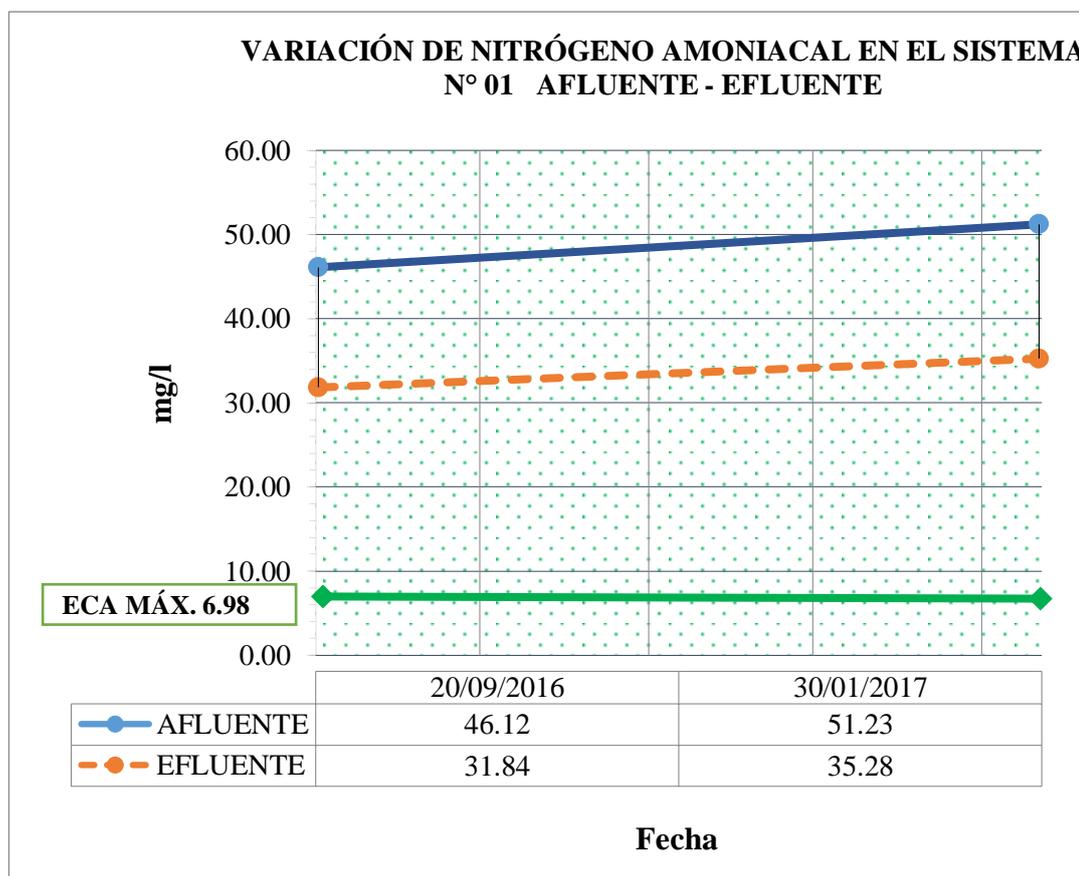


**Figura 51. Variación de fósforo total en el sistema de tratamiento N° 02**

Fuente: Elaboración propia

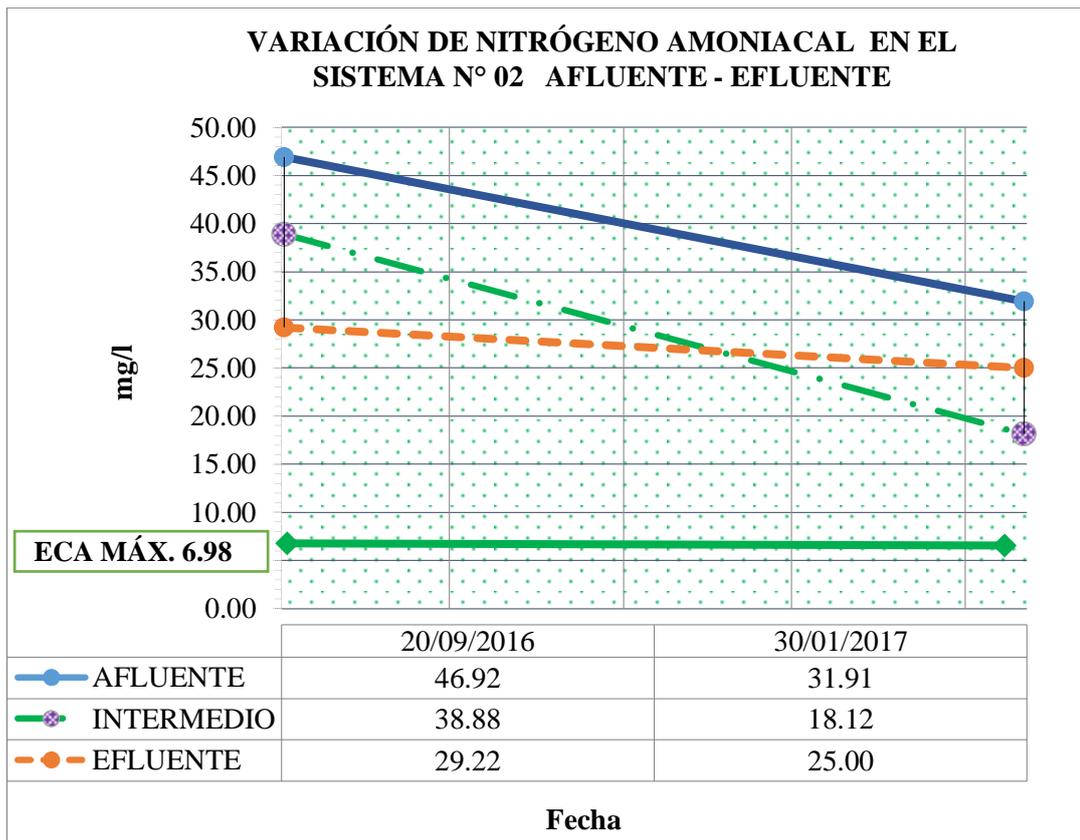
**Nitrógeno Amoniaco NH<sub>4</sub> (mg/l):** El amoniaco es uno de los componentes transitorios en el agua puesto que es parte del ciclo del nitrógeno y se ve influido por la actividad biológica. Es el producto natural de descomposición de los compuestos orgánicos nitrogenados. En el agua puede aparecer en forma molecular o como ion amonio, dependiendo del pH. Para el sistema de tratamiento N° 01, el valor máximo de ingreso es de 51.23 mg/L y el valor máximo en la salida del sistema de tratamiento es 35.28 mg/L. Por otro lado en el sistema de tratamiento N° 02, el valor máximo de ingreso es de 46.92 mg/L y el valor máximo en la salida del sistema de tratamiento es 29.22 mg/L (ver Tabla 37), dichos valores son representados en la Figura 52 y la Figura 53.

En los ECA en la Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, se establece un valor máximo de 6.98 mg/L de concentración del parámetro de nitrógeno amoniacal en ríos de la Sierra, por lo que los sistemas de tratamiento no estarían cumpliendo con la normativa.



**Figura 52. Variación de nitrógeno amoniacal en el sistema de tratamiento N° 01**

Fuente: Elaboración propia



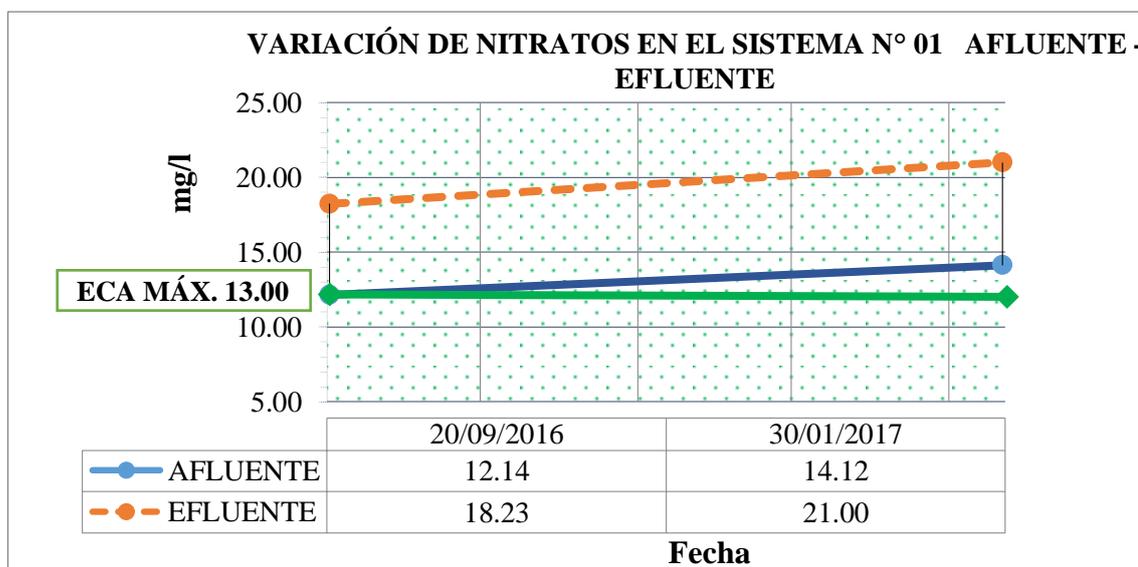
**Figura 53. Variación de nitrógeno amoniacal en el sistema de tratamiento N° 02**

Fuente: Elaboración propia

**Nitratos como  $\text{NO}_3$  (mg/l):** En un agua típicamente urbana no deben existir nitratos y su presencia se debe a la oxidación del nitrógeno amoniacal en presencia de oxígeno, ya que la preponderancia del nitrógeno en forma de nitratos en un agua residual es un fiel indicador de que el residuo se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno.

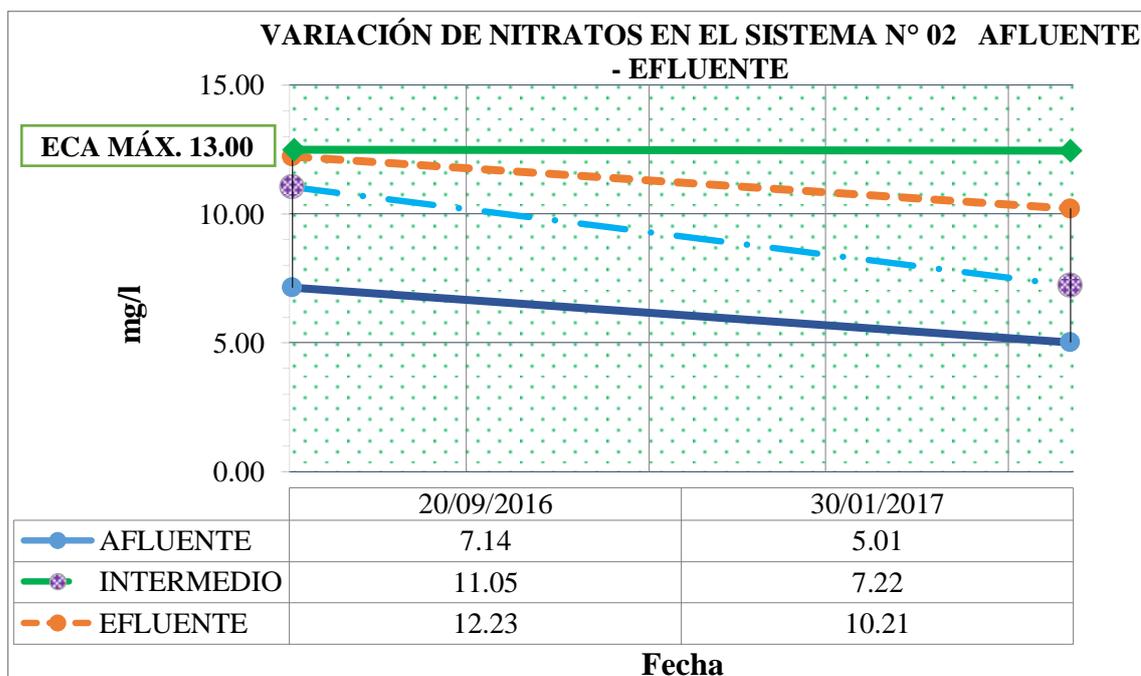
De acuerdo a los resultados obtenidos de la caracterización de aguas residuales, para el sistema de tratamiento N° 01 se tiene un valor máximo en el afluente de 14.12 mg/L y un valor máximo en el efluente de 21.00 mg/L, mientras que para el sistema de tratamiento N° 02 se tiene un valor máximo de 7.14 mg/L (afluente) y de 12.23 mg/L (efluente). Los resultados se muestran en la Tabla 37.

En los ECA en la Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, se establece un valor máximo de 13 mg/L de concentración de nitratos en agua de ríos de la sierra, por lo que el sistema de Tratamiento N° 01 no cumple con la normativa, mientras que el sistema de tratamiento N° 02 si cumple (ver Figura 56, Figura 57).



**Figura 54. Variación de nitratos en el sistema de tratamiento N° 01**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 55. Variación de nitratos en el sistema de tratamiento N° 02**

Fuente: Elaboración propia

**d) Parámetros evaluados en laboratorio – Microbiológicos**

El análisis se realizó en el laboratorio la cual se determinó por el método número más probable (NMP), los parámetros como coliformes totales, coliformes fecales, Vibrio cholerae, Escherichiacoli, Salmonella sp, huevos de helmintos), se muestran en la Tabla 37.

Tabla 37:

Resultados de laboratorio, análisis de parámetros físico, químicos y microbiológicos de aguas residuales

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES	PRIMER BLOQUE DE MUESTRAS - FECHA: 20/09/2106				SEGUNDO BLOQUE DE MUESTRAS - FECHA: 30/01/2017				
	SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 01		SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 02		SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 01		SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 02		
	AFLUENTE	EFLUENTE	AFLUENTE	EFLUENTE	AFLUENTE	EFLUENTE	AFLUENTE	EFLUENTE	
<b>PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS</b>									
Temperatura (°C)	14.00	13.20	14.00	12.45	13.05	12.56	13.50	12.20	11.50
potencial de hidrógeno (pH)	8.47	7.54	9.78	7.72	7.14	8.03	7.33	7.78	6.88
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	195.81	145.79	150.92	138.09	132.12	211.38	152.20	134.82	116.21
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	374.00	277.00	289.00	265.13	255.00	405.50	305.50	257.60	220.80
Aceite y grasas (mg/l)	25.20	12.80	20.20	12.93	10.30	28.11	15.31	17.21	6.02
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	363.20	249.32	323.14	220.43	123.20	300.29	263.30	343.10	102.12
Fósforo total (mg/l)	3.27	0.32	1.14	1.03	0.23	5.11	0.22	3.63	0.11
Nitratos como NO <sub>3</sub> (mg/l)	12.14	18.23	7.14	11.05	12.23	14.12	21.00	5.01	10.21
Nitrito como NO <sub>2</sub> (mg/l)	4.50	0.18	2.44	0.96	0.33	5.23	1.52	3.11	0.23
Nitrogeno amoniacal NH <sub>4</sub> (mg/l)	46.12	31.84	46.92	38.88	29.22	51.23	35.28	31.91	25.00
<b>PARÁMETROS MICROBIOLÓGICO</b>									
Coliformes totales (NMP/100ml)	11000.00	11000.00	11000.00	-	11000.00	11000.00	11000.00	11000.00	11000.00
Coliformes fecales (E.coli) (NMP/100ml)	350.00	190.00	360.00	-	210.00	340.00	110.00	90.00	30.00
Vibrio cholerae (NMP/100ml)	130.00	70.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	90.00	0.00
Salmonella SP.	Presencia /100ml	Presencia /100ml	0 (ausencia)	-	0 (ausencia)	presencia/100ml	presencia/100ml	presencia/100ml	0 (ausencia)
Huevos de helmintos (cant/lt)	30.00	20.00	35.00	-	21.00	35.00	26.00	40.00	20.00

Fuente: Elaboración Propia según los resultados de análisis de laboratorio

Tabla 38:

Eficiencia de remoción de los sistemas de tratamiento de aguas residuales - Taraco

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES	PROMEDIO						EFICIENCIA %		
	SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 01		SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 02		SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 01	SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 02	LAGUNA N° 01	LAGUNA N° 02	EN EL SISTEMA
	AFLUENTE	EFLUENTE	AFLUENTE	INTERMEDIO					
<b>PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS</b>									
Temperatura (°C)	13.28	13.35	13.25	12.33	12.28	-	-	-	-
potencial de hidrógeno (pH)	8.25	7.44	8.78	7.06	7.01	-	-	-	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	203.60	149.00	142.87	134.49	124.17	26.82%	5.87%	7.68%	13.09%
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	389.75	291.25	273.30	260.57	237.90	25.27%	4.66%	8.70%	12.95%
Aceite y grasas (mg/l)	26.66	14.06	18.71	10.82	8.16	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	331.75	256.31	333.12	252.18	112.66	22.74%	24.30%	55.33%	66.18%
Fósforo total (mg/l)	4.19	0.27	2.39	1.16	0.17	93.56%	51.57%	85.28%	92.87%
Nitratos como NO <sub>3</sub> (mg/l)	13.13	19.62	6.08	9.14	11.22	-	-	-	-
Nitrito como NO <sub>2</sub> (mg/l)	4.87	0.85	2.78	0.84	0.28	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal NH <sub>4</sub> (mg/l)	48.68	33.56	39.42	28.50	27.11	31.05%	27.69%	4.88%	31.22%
<b>PARÁMETROS MICROBIOLÓGICO</b>									
Coliformes totales (NMP/100ml)	11000.00	11000.00	11000.00	-	11000.00	0.00%	-	-	0.00%
Coliformes fecales (E.coli) (NMP/100ml)	345.00	150.00	225.00	-	120.00	56.52%	-	-	46.67%
Vibrio cholerae (NMP/100ml)	65.00	35.00	45.00	-	0.00	46.15%	-	-	100.00%
Salmonella SP.	Presencia /100ml	Presencia /100ml	Presencia /100ml	0 (ausencia)	0 (ausencia)	-	-	-	-
Huevos de helmintos (cant/t)	32.50	23.00	37.50	-	20.50	29.23%	-	-	45.33%

Fuente: Elaboración propia según los resultados de análisis de laboratorio

Tabla 39:

## Resumen de la caracterización de aguas residuales en ambos sistemas

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES	PROMEDIO DE AMBOS SISTEMAS	
	AFLUENTE	EFLUENTE
<b>PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS</b>		
Temperatura (°C)	13.27	12.81
potencial de hidrógeno (pH)	8.52	7.22
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	173.23	136.58
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	331.53	264.58
Aceite y grasas (mg/l)	22.68	11.11
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	332.43	184.49
Fósforo total (mg/l)	3.29	0.22
Nitratos como NO-3 (mg/l)	9.60	15.42
Nitrito como NO-2 (mg/l)	3.82	0.57
Nitrogeno amoniacal NH4 (mg/l)	44.05	30.34
<b>PARAMETROS MICROBIOLÓGICO</b>		
Coliformes totales (NMP/100ml)	11000.00	11000.00
Coliformes fecales (E.coli) (NMP/100ml)	285.00	135.00
Vibrio cholerae (NMP/100ml)	55.00	17.50
Salmonella SP.	Presencia	Presencia
Huevos de helmintos (cant/lt)	35.00	22.00

**Fuente:** Elaboración propia según los resultados de análisis de laboratorio

#### 4.4 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

##### 4.4.1 Verificación del cumplimiento de los parámetros con respecto a la norma – Límites Máximos Permisibles

Según los resultados del presente estudio en las lagunas, los efluentes deben cumplir con las normas nacionales vigentes de calidad LMP, para ser descargadas a cuerpos receptores sin generar contaminación (ver Tabla 40 y Tabla 41).

**Tabla 40:**

**Comparación del efluente con los LMPs - Sistema de tratamiento N° 01**

<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 01</b>						
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas</b>	<b>Parámetros de salida en el sistema</b>	<b>% excedencia</b>	<b>Nivel de contaminación</b>	
Aceites y grasas	mg/L	20	<b>14.06</b>	<b>NO EXCEDE</b>	<b>Aceptable</b>	
Coliformes tolerantes	termo ml	NMP/100 10,000	<b>11000.00</b>	<b>10.00%</b>	<b>No aceptable</b>	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100	<b>149.00</b>	<b>49.00%</b>	<b>No aceptable</b>	
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200	<b>291.25</b>	<b>45.63%</b>	<b>No aceptable</b>	
pH	Unidad	6.5 – 8.5	<b>7.44</b>	<b>PERMITIDO</b>	<b>Aceptable</b>	
Sólidos totales en Suspensión	ml/L	150	<b>256.31</b>	<b>70.87%</b>	<b>No Aceptable</b>	
Temperatura	°C	<35	<b>13.35</b>	<b>PERMITIDO</b>	<b>Aceptable</b>	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 41:****Comparación del efluente con los LMPs - Sistema de tratamiento N° 02**

<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 02</b>						
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas</b>	<b>Parámetros de salida en el sistema</b>	<b>% excedencia</b>	<b>Nivel de contaminación</b>	
Aceites y grasas	mg/L	20	<b>8.16</b>	<b>NO EXCEDE</b>	<b>Aceptable</b>	
Coliformes tolerantes	termo NMP/100 ml	10,000	<b>11000.00</b>	<b>10.00%</b>	<b>No aceptable</b>	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100	<b>124.17</b>	<b>24.17%</b>	<b>No aceptable</b>	
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200	<b>237.90</b>	<b>18.95%</b>	<b>No aceptable</b>	
pH	Unidad	6.5 – 8.5	<b>7.01</b>	<b>PERMITIDO</b>	<b>Aceptable</b>	
Sólidos totales en Suspensión	ml/L	150	<b>112.66</b>	<b>NO EXCEDE</b>	<b>Aceptable</b>	
Temperatura	°C	<35	<b>12.28</b>	<b>PERMITIDO</b>	<b>Aceptable</b>	

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 40 y la Tabla 41, se observan que al comparar los valores observados en los efluentes con los LMP establecidos en el D.S. N° 003 – 2010 – MINAM, se deduce que el nivel de contaminación es alto ya que los contaminantes potenciales (DBO<sub>5</sub>, DQO) superan los LMP en una cantidad considerable, contaminando y afectando de este modo a la vida acuática existente en el río Ramis. Con lo cual se deduce que el agua residual de los efluentes no cumple con los LMP para

poder ser vertidas al cuerpo receptor, contaminando y afectando a la vida acuática existente en el río Ramis.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) encontrada en los sistemas de tratamiento es alta ya que superan los límites máximos permisibles y para la protección ecológica es necesario disminuir la carga orgánica (DBO<sub>5</sub>) de las aguas residuales. Para lograr de esta manera que el nivel de oxígeno disuelto (OD) en los cuerpos receptores se vea menos comprometido, con el consiguiente beneficio para los peces y demás organismos acuáticos.

La demanda química de oxígeno (DQO) debe ser monitoreado en las descargas de aguas residuales ya que es un contaminante potencial (ácido) y afecta al cuerpo receptor destruyendo los seres vivientes microscópicos. En los efluentes de los sistemas de tratamiento N° 01 y N° 02 se puede notar valores de 291.25 mg/L y 237.90 mg/L respectivamente. Los cuales están muy por encima del valor de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N° 003 – 2010 – MINAM que es de 200 mg/L. Por otro lado, en la Tabla 42 y Tabla 43 se puede apreciar la eficiencia degradativa de la DBO<sub>5</sub> Y DQO en ambos sistemas son bajas.

#### 4.4.2 Eficiencia del sistema de tratamiento

**Tabla 42:**

**Remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO- Sistema de tratamiento N° 01**

PARÁMETROS	SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 01		EFICIENCIA DEGRADATIVA
	VALORES DE AGUA RESIDUAL		
	AFLUENTE	EFLUENTE	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	203.60	149.00	26.82%
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	389.75	291.25	25.27%

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 43:**

**Remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO- Sistema de tratamiento N° 02**

PARÁMETROS	SISTEMA DE TRATAMIENTO N° 02		EFICIENCIA DEGRADATIVA
	VALORES DE AGUA RESIDUAL		
	AFLUENTE	EFLUENTE	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	142.87	124.17	13.09%
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	273.30	237.90	12.95%

**Fuente:** Elaboración propia

**4.4.3 Relación entre DBO y DQO, medida de la biodegradabilidad.**

En esta parte se realizara la evaluación a nivel de depuración de la DBO para su vertido al río.

Si la relación de la DBO total entre la DQO total es mayor a 0.6, se puede concluir que el agua tiene influencia doméstica, y si es menor a 0.6, el agua presenta influencia industrial.

$$\frac{DBO_T}{DQO_T} \geq 0.6 \dots\dots\dots 4.2$$

Para el sistema de tratamiento N° 01 se tiene una concentración de DBO<sub>5</sub> de 203.6 mg/l y de DQO 389.75 mg/l, la relación entre DBO/DQO es de 0.522. por otro lado en el sistema de tratamiento N° 02 se tiene una concentración de DBO<sub>5</sub> de 142.87 mg/l y de DQO 273.3 mg/l, siendo la relación de DBO/DQO = 0.523 lo cual indica que el agua residual de la localidad del distrito de Taraco contiene en sus afluentes agua residual del tipo industrial, sin embargo es necesario medir la biodegradabilidad.

La materia orgánica biodegradable se mide en términos de la DBO y la materia orgánica total por la DQO. Según la tabla 9 descrito en el capítulo II el agua residual presenta una biodegradabilidad ALTA.

#### 4.4.4 Identificación de la causa del problema

**a. La Operación y Mantenimiento:** Una de las causas del mal funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales de la localidad del distrito de Taraco es la mala operación y mantenimiento del sistema de tratamiento mediante lagunas de estabilización. Tal es el caso de la presencia sobrecargada de sedimentos (lodos) en las lagunas de ambos sistemas de tratamiento. El cumplimiento de este objetivo está condicionado por la correcta realización de la operación y el mantenimiento de las diferentes etapas que conforman el sistema de tratamiento.

**b. La degradación de algunas estructuras:** las lagunas de estabilización primarias en ambos sistemas se encuentran colapsadas debido a que se construyeron sin alguna protección en los taludes en el cual se está contaminando al suelo por el proceso de la infiltración y el tiempo de servicio de estas lagunas alcanza al tiempo del periodo de diseño.

**c. Un tren de tratamiento incompleto:** los sistemas de tratamiento de la localidad del distrito de Taraco no cuentan con ningún sistema de tratamiento preliminar solo se tiene estructuras de (01 Und) laguna primaria (sistema N° 01) y (01 Und) laguna primaria, (01 Und) laguna secundaria (sistema N° 02).

#### 4.4.5 Definición de la alternativa de solución

Para la mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales de la localidad del distrito de Taraco es necesaria la realización de alternativas y actividades como la operación y mantenimiento correspondiente, así también construir nuevas infraestructuras para el mejor tratamiento, manejo y cuidado del sistema de lagunas y la planta de tratamiento en general. Para tal efecto se toma en cuenta los criterios considerados en la metodología de propuesta de mejoramiento descritos en los ítems de metodología.

La propuesta de mejoramiento del sistema de tratamiento de las aguas residuales debe constar de un conjunto de operaciones físicas, biológicas y químicas, que persigan eliminar la mayor cantidad posible de contaminantes antes de su vertido, de forma que los niveles de contaminación que queden en el efluente tratado cumpla los límites máximos permisibles (LMP) y puedan ser asimilados de forma natural por los cauces receptores.

#### **4.5 PROPUESTA DEL TREN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

##### **4.5.1 Tratamiento preliminar**

###### **a. Desbaste**

Consiste en la eliminación de los sólidos de tamaño grande y mediano (trozos de madera, trapos, raíces, etc.), así como de finos, que de otro modo podrían deteriorar o bloquear las unidades de tratamiento posterior y obstruir las líneas de conducción.

El procedimiento más usual consiste en hacer pasar las aguas a través de rejillas, que de acuerdo con la separación entre los barrotes se clasifican 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.

###### **b. Desarenador**

Su objetivo es la extracción de la mayor cantidad posible de las arenas presentes en las aguas residuales. Dentro de la denominación "arenas" se incluyen las arenas 18 propiamente dichas, gravas y partículas más o menos grandes de origen mineral u orgánico. Con esta operación se pretende proteger los equipos mecánicos contra la abrasión y el desgaste y evitar la acumulación de estas materias pesadas. Normalmente,

se dimensionan los desarenadores para la eliminación de partículas de tamaño superior a los 0,2 mm.

### **c. Medidor de caudal- canaleta Parshall**

Después de las cribas y desarenadores se incluirá un medidor de caudal de régimen crítico, siendo del tipo Parshall.

## **4.5.2 Tratamiento primario**

### **a. Tanque Imhoff:**

El tanque Imhoff es una unidad de tratamiento primario cuya finalidad es la remoción de sólidos suspendidos.

Para comunidades de 5000 habitantes o menos, los tanques Imhoff ofrecen ventajas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, ya que integran la sedimentación del agua y la digestión de los lodos sedimentados en la misma unidad, por ese motivo también se llama tanques de doble cámara (CEPIS, 2005).

Los tanques Imhoff ofrecen ventajas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, ya que integran la sedimentación del agua y la digestión de los lodos sedimentados en la misma unidad, por ese motivo también se llama tanques de doble cámara.

Los tanques Imhoff tienen una operación muy simple y no requiere de partes mecánicas, sin embargo para su uso es necesario que las aguas residuales pasen por los procesos de tratamiento preliminar de cribado y de remoción de arena. El tanque Imhoff típico es de forma rectangular y se divide en tres compartimientos: Cámara de sedimentación, cámara de digestión de lodos y área de ventilación y acumulación de natas.

El tanque imhoff elimina del 40 al 50% de sólidos suspendidos y reduce el DBO en un 25 a 50%. Los lodos acumulados en el digestor del tanque imhoff se extraen periódicamente se conducen a lechos secados.

Los aceites y grasas se acumulan en la cámara de natas del tanque Imhoff se asume una remoción del 90 %.

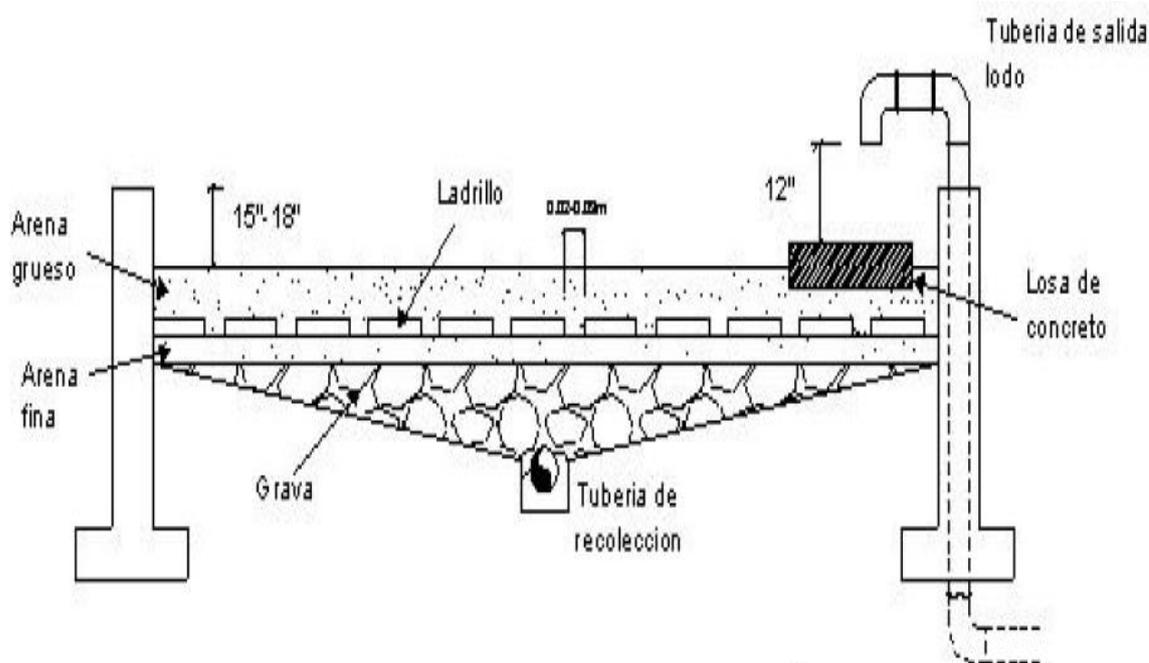
Debido a esta baja remoción de DBO y coliformes, lo que se recomendaría es enviar el efluente hacia una laguna facultativa, humedal artificial, para que haya una buena remoción de microorganismos en el efluente.

#### **b. Lechos de secados de lodos**

En el lecho de secado, los lodos que suelen tener alto contenido de agua, son vertidos a una superficie acondicionada, donde son expuestos al ambiente (Figura 56). Este procedimiento permite que con el tiempo se dé la deshidratación y pérdida de agua contenida en las partículas sólidas, formándose una capa superior dura, que inicialmente impide la evaporación de agua en las capas inferiores. Sin embargo, progresivamente, los lodos empiezan a formar grietas, facilitando el secado de las capas inferiores, hasta formar lodos secos, que facilitan su disposición final. En zonas de alta precipitación es recomendable añadir a la estructura un techo de protección que evite que el agua de lluvia ingrese al área destinada al lecho de secado.

Es preferible contar con dos o más lechos de secado para facilitar el mantenimiento y la operación del sistema. Esta estructura, construida habitualmente de mampostería, concreto o de tierra (con diques), debe tener una profundidad útil de 50 a 60 cm. y un ancho entre 3 y 6 m. Está compuesta de una capa de ladrillos colocados sobre el medio filtrante, que está constituido por arena fina, una capa inferior de grava y drenes de tubos de 100 mm de diámetro. Asimismo, deberá proveer de una tubería de

descarga con su respectiva válvula de compuerta y losa de fondo, para impedir la destrucción del lecho.



**Figura 56: Corte transversal de una planta de lecho de secado.**

Fuente: CEPIS (2005).

### 4.5.3 Tratamiento secundario

#### a. Selección de la tecnología

Después del análisis y comparación de las tecnologías seleccionadas se llega a concluir que el tratamiento que más se adapta a las condiciones de terreno, agua residual, tipo de suelo, área disponible, costos de construcción, operación y mantenimiento, etc., son los sistemas acuáticos por humedales artificiales con una significativa puntuación de 212 puntos con respecto a otros sistemas de tratamiento por medios naturales, tal como se puede apreciar en la Tabla 44.

**Tabla 44:**

**Matriz de selección final – toma de decisiones**

CRITERIOS	VARIABLES	TECNOLOGÍA				
		IR	IL	ES	HFL	HSS
<b>Cobertura de Agua potable</b>	Tiene servicio	5	5	5	5	5
	No tiene Servicio	-	-	-	-	
	Cobertura Parcial	-	-	-	-	
<b>Existencia y tipo de alcantarillado</b>	Alcantarillado separado	5	5	5	5	5
	Alcantarillado Mixto	-	-	-	-	
	Alcantarillado Combinado	-	-	-	-	
<b>Población</b>	Población	5	5	5	5	5
<b>Características del terreno</b>	Superficie necesaria (m <sup>2</sup> /hab)	3	3	5	5	5
	Profundidad del nivel freático (m)	5	1	5	5	5
	Pendiente de terreno (%)	3	3	3	5	5
	Relieve (Adimensional)	3	1	3	5	5
<b>Características del agua residual</b>	Origen (Adimensional)	5	5	5	5	5
	Caudal (l/s)	3	3	3	3	3
	Temperatura de agua residual (°C)	3	3	3	3	3
<b>Características del suelo</b>	Tipo de suelo (Adimensional)	3	3	3	3	3
	Textura (Adimensional)	1	1	5	5	5
	Velocidad de infiltración (mm/h)	1	1	5	5	5
	Permeabilidad (Adimensional)	1	3	5	5	5
<b>Características climáticas</b>	Temperatura (°C)	3	3	3	3	3
	Evapotranspiración (mm/mes)	3	3	3	3	3
	Vientos (m/s)	5	3	3	5	5
	Precipitación (mm/mes)	5	5	3	3	3
<b>Remoción de los parámetros básicos</b>	Remoción de SST (%)	3	3	3	3	3
	Remoción de DBO (%)	3	3	3	3	3
	Remoción de DQO (%)	3	3	3	3	3
	Remoción nitrógeno Total (%)	3	3	3	3	3

... Continuación

CRITERIOS	VARIABLES	TECNOLOGÍA				
		IR	IL	ES	HFL	HSS
	Remoción de Fósforo total (%)	3	3	3	1	1
	Remoción de coliformes fecales (%)	5	5	5	5	5
<b>Impacto ambiental sobre el entorno</b>	Suelo	1	1	1	3	3
	Geomorfología del suelo	1	1	1	3	3
	Contaminación del suelo	1	1	1	3	3
	Contaminación de agua	3	3	3	5	5
	Recarga cuerpo receptor y riego	1	1	1	1	1
	Contaminación del aire	3	3	3	5	5
	Generación de olores	3	3	3	5	5
	Proliferación de vectores	3	3	3	5	5
	Polvo	3	3	3	1	1
	Ruido	5	5	5	5	5
	Árboles	3	3	5	5	5
	Arbustos	3	3	5	5	5
	Hierbas	3	3	5	5	5
	Cultivos	3	3	3	5	5
	Pájaros (aves)	3	3	3	5	5
	Animales terrestres	3	3	3	5	5
	Paisaje	3	3	3	5	5
Agricultura	1	1	1	1	1	
<b>Impacto ambiental sobre el entorno</b>	Ganadería	1	1	1	1	1
	Empleo	3	3	3	3	3
	Servicios básicos	3	3	3	3	3
<b>Tecnologías de tratamiento y su necesidad de obra civil</b>	Movimiento de tierra (adimensional)	3	3	5	5	5
	Construcción de instalaciones (Adimensional)	5	5	5	5	5
<b>Operación y mantenimiento para cada tecnología de tratamiento.</b>	Necesidad de equipo (Adimensional)	5	5	5	5	5
	Funcionamiento (Adimensional)	3	3	5	5	5
	Capacitación del personal (Adimensional)	3	3	1	3	3
	Tiempo de control (Adimensional)	5	5	5	5	5
	Frecuencia de control (Adimensional)	5	5	5	3	3

... Continuación

CRITERIOS	VARIABLES	TECNOLOGÍA				
		IR	IL	ES	HFL	HSS
<b>Costos de construcción de obra civil</b>	Coste por habitante(USD/hab)	3	3	5	3	3
<b>Costos mensuales de operación y mantenimiento para los tratamientos naturales</b>	Coste por habitante (USD/hab/anual)	3	1	3	3	3
<b>SUMATORIA TOTAL</b>		<b>170</b>	<b>162</b>	<b>190</b>	<b>212</b>	<b>212</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Ahora bien, existen dos alternativas de tratamiento de humedales artificiales con igualdad de puntajes, por lo que se evaluará los criterios técnicos (ventajas y desventajas) para elegir el sistema de tratamiento natural que más se adecue a las necesidades de la localidad del distrito de Taraco (ver Tabla 45).

**Tabla 45:**

**Comparación entre los HFL y HSS – Toma de decisiones**

	<b>HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL (HFL)</b>	<b>HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL</b>
Tratamiento	Tratamiento de flujos secundarios (aguas ya tratadas por otros medios ejem: lagunas, biodiscos, fangos activados, etc.)	Par tratar flujos primarios (aguas pretratadas ejem. Tanque imhoff, pozos sépticos).
Insectos	Control es caro.	No existe.
Protección térmica	Mala, las bajas temperaturas afectan su remoción.	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo el agua mantiene una temperatura constante.

... Continuación

	<b>HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL (HFL)</b>	<b>HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL</b>
Área	Requieren de superficies de mayor tamaño.	Requieren de superficies de menor tamaño.
Costo	Menor costo en relación al subsuperficial.	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%.
Valor ecosistema	Mayor valor como ecosistema para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna.	Menor valor como ecosistema para la vida, el agua es difícilmente accesible a la fauna.
Operación	Usados para tratamiento terciario y mejoramiento de calidad de agua residual.	Puede utilizarse como tratamiento secundario.

**Fuente:** Huallpa et al., (2010)

### Conclusión

Para la localidad del distrito de Taraco se ha escogido realizar un **humedal de flujo subsuperficial de flujo horizontal**, debido a que ambiental y técnicamente se adecua a las bajas temperaturas que presenta la zona, reducido espacio, tratamiento más eficaz y la no generación de olores que podrían tener impactos negativos como la proliferación de insectos teniendo efecto en la población en la contracción de enfermedades, ya que el área para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra no muy lejos de la población.

El acondicionamiento de un medio granular para el funcionamiento de un HSS no sería un factor limitante debido a que la pendiente es  $< 5\%$  en la zona de construcción de las balsas que conforman el humedal, por lo que el movimiento de

tierras no sería considerable en efecto no implicaría un aumento de costos adicional significativo.

#### **b. Componentes 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 las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población. 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, en este caso (Delgadillo et al., 2010).

**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.

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

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.

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 (Delgadillo et al., 2010).

El medio es responsable directo de la extracción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas.

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 adsorción 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 (Delgadillo et al., 2010).

Por el contrario, si el lecho granular está formado por gravas y arenas, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica. 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 (Delgadillo et al., 2010).

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

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

En la Tabla 46, se resumen las características de las tres especies más utilizadas en los humedales artificiales.

**Tabla 46:**

**Características de las especies vegetales más utilizadas en humedales artificiales**

Nombre Científico	Familia	Nombre (s) común (es)	Características sobresalientes	Distancia de siembra	Penetración de raíces en grava	Temperatura		Salinidad	pH
						Deseable	Germi-nación de semilla		
 Thypha spp	Tifácea	Espadaña, Anea, Junco, Bayón, Bayunco, Bohordo, Henea, Junco de la pasión, Maza de agua	✓ Ubicua en distribución ✓ Capaz de crecer bajo diversas condiciones medio ambientales ✓ Se propaga fácilmente ✓ Capaz de producir una biomasa anual grande ✓ Tiene potencial pequeño de remoción de N y P por la vía de la poda y cosecha.	60 cm	Relativamente pequeña (30 cm) por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	10-30	12-24	30	4-10
 Scirpus spp	Ciperácea	Totora	✓ Perennes ✓ Crecen en grupo ✓ Plantas ubicuas ✓ Crecen en aguas costeras, interiores salobres y humedales ✓ Crecen desde 5 cm hasta 3 m de profundidad	30 cm	60 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	18 -27	20	4-9	

... Continuación

Nombre Científico	Familia	Nombre (s) común (es)	Características sobresalientes	Distancia de siembra	Penetración de raíces en grava	Temperatura		Salinidad
						Deseable	Germi-nación de semilla	
Phragmites spp			<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Anuales</li> <li>✓ Altos</li> <li>✓ Rizoma perenne extenso</li> <li>✓ Plantas acuáticas usadas más extensas</li> <li>✓ Pueden ser más eficaces en la transferencia de oxígeno</li> </ul>					
australis más común				40 cm	40 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	12-23	10-30	45
	Gramínea	Carrizo	<p>porque sus rizomas penetran verticalmente y más profundamente. Son muy usadas en humedales porque ofrecen un bajo valor alimenticio</p>					2-8



Fuente: Delgadillo et al., (2010)

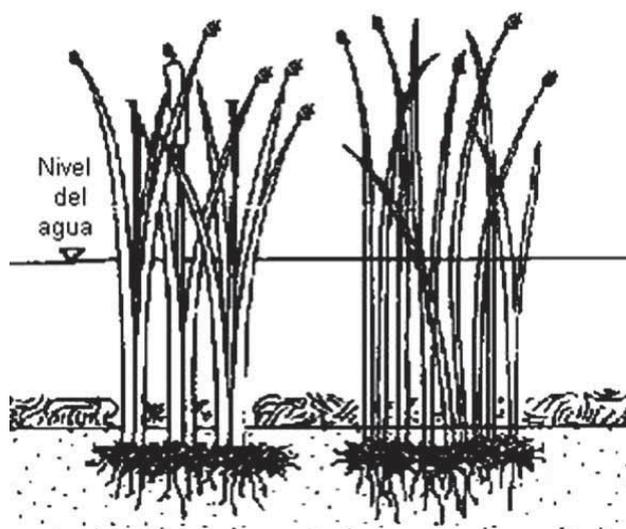
## Microorganismos

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 y la desinfección (Delgadillo et al., 2010).

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 (Delgadillo et al. 2010).

### 4.6 LA TOTORA PLANTA FITODEPURADURA

Como se puede observar, la totora (*Scirpus californicus*) es uno de los vegetales que tiene la capacidad depuradora (Figura 57). En la localidad de Taraco se dispone de este vegetal encontrándose en la laguna **Meccaraque** que se ubican dentro de la jurisdicción de la localidad del distrito de Taraco, adaptándose de forma natural siendo esta especie traída del Lago Titicaca que está cerca de la localidad del distrito de Taraco (ver Figura 58).



**Figura 57. Plantas heliófitas en medio acuático – totora**  
Fuente: Delgadillo et al., (2010)



**Figura 58. Totoras existentes en la laguna MECCARAQUE – Taraco**  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.1 Características generales de la totora

La totora es una de las plantas helófitas adaptada a condiciones de saturación de humedad e inundación, siempre que el agua no las cubra. Es decir, soportan una fuerte limitación en la disponibilidad de oxígeno en el suelo. Comprenden una parte debajo del nivel del agua, y otra parte aérea.

Según Delgadillo et al., (2010) el papel de las helófitas en los humedales artificiales se resume en los siguientes aspectos:

- Servir de filtro para mejorar los procesos físicos de separación de partículas.
- Asimilación directa de nutrientes (en especial Nitrógeno y Fósforo) y metales, que son retirados del medio e incorporados al tejido vegetal.
- Actuar a modo de soporte para el desarrollo de biopelículas de microorganismos, que actúan purificando el agua mediante procesos aerobios de degradación.
- Transportar grandes cantidades de oxígeno desde los tallos hasta sus raíces y rizomas, donde es usado por dichos microorganismos.

#### **a. Características morfológicas**

La totora y las helófitas en general son ancestros directos de los denominados “vegetales vasculares” y por tanto, muy similares. Tienen epidermis muy delgadas a fin de reducir la resistencia al paso de gases, agua y nutrientes y tejidos; grandes espacios intercelulares que forman una red de conductos huecos en los que se almacena y circula aire con oxígeno. Esto permite la transferencia de oxígeno desde el aire y órganos fotosintéticos, y desde ahí hacia las raíces (Delgadillo et al., 2010).

#### **– Rizomas**

La totora tiene rizomas, que son tallos subterráneos que crecen paralelamente a la superficie del suelo (Figura 59). Éstos presentan a un lado raíces adventicias y al otro ramas hacia la superficie con hojas y yemas (Delgadillo et al., 2010). Acumulan reservas, con lo que aumentan su volumen, y en épocas favorables las yemas aprovechan esas reservas para germinar.



**Figura 59. Raíces y brotes de la totora**

Fuente: Delgadillo et al., (2010)

**- Tallos**

Varían de 1 m a 4 m, erectos, remotos o próximos entre sí; lisos, trígono o subteretes, verde-amarillentos cuando secos. Presentan vainas foliares pardo oscuro, sin láminas. Los tallos tienen aerénquimas, que son tejidos sin color con grandes espacios intercelulares llenos de aire, que facilitan la flotación y la llegada de aire a los órganos sumergidos (Figura60).



**Figura 60. Tallo de totora.**

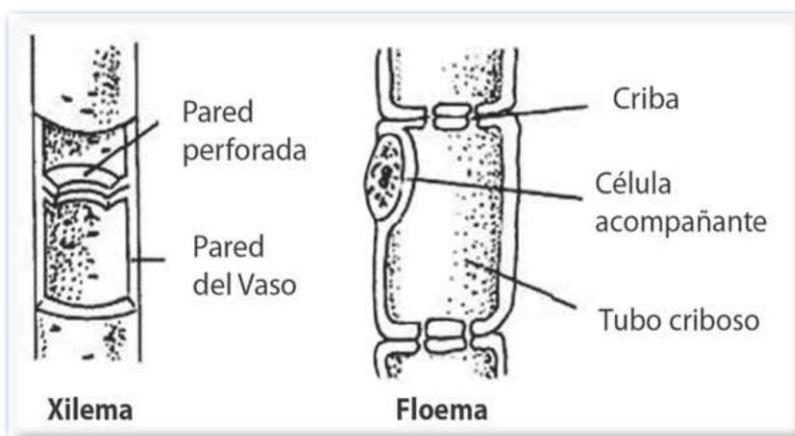
Fuente: Delgadillo et al., (2010)

### - Xilema

El xilema está formado por vasos leñosos o tráqueas. Incluyen también las denominadas traqueidas, formadas por células alargadas con orificios llamados puntuaciones, que las comunican entre sí (Figura 61).

### - Floema

El floema está constituido por tubos o células cribosas. Entre las células existen tabiques con agujeros o cribas que se obturan a bajas temperaturas y dificultan la conducción de sustancias orgánicas (Figura 61).



**Figura 61. Corte longitudinal del xilema y el floema en la totora.**

Fuente: Delgadillo et al., (2010)

### - Inflorescencia

La inflorescencia es decompuesta (Figura 62) presenta brácteas hasta 10 cm; bracteolas hasta 5 cm. Espiguillas de 3 mm, ovoides, agudas, agrupadas, rojizo glanduloso. Aquenios oblongos, amarillentos o pardo oscuro; escamas irregularmente plumosas (Delgadillo et al. 2010).



**Figura 62. Inflorescencia de la totora**

Fuente: Delgadillo et al. (2010)

#### **- Reproducción**

En la mayoría de los casos, la totora se reproduce vegetativamente. La reproducción por semillas es muy limitada debido a que generalmente no logran germinar. La reproducción vegetativa es por desarrollo de propágulos vegetativos; o sea, mediante células especializadas en propagar la planta (meristemos), agrupadas en estructuras especiales (rizomas). De esta manera se producen individuos nuevos, pero adaptados al medio ambiente.

#### **b. Capacidad depuradora de la totora**

Se tiene referencia de algunos estudios sobre la capacidad depuradora de los humedales con totora (ver Tabla 47).

**Tabla 47:****Capacidad depuradora de humedales con totora (*Scirpus spp.*)**

Parámetros	Metales pesados	Nitrógeno	Fosfato	fosforo	Coliformes y bacterias
Ujang et al (2004)	85% *				
Soto et al (1999)		22 a 33%*	30% *	20% *	99.9% *

**Nota.** \* % de reducción de los valores de los parámetros luego de un paso por un humedal

**Fuente:** Delgadillo et al., (2010)

## 4.7 ECUACIONES Y PARÁMETROS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES COMO PROPUESTA DE MEJORAMIENTO

### 4.7.1 Periodo de diseño

Es el periodo de tiempo en el cual la capacidad de servicio del sistema de tratamiento de aguas residuales cubre la demanda proyectada minimizando el valor actual de costos de inversión, operación y mantenimiento durante el periodo de análisis del proyecto. Es recomendable su cálculo proponiéndose los siguientes periodos de diseño: para plantas de tratamiento de aguas residuales se considerará entre 20 y 30 años de periodo óptimo. (Norma OS 090, RNE).

### 4.7.2 Población de diseño

La población de diseño corresponde a la población futura servida, la misma que se calcula utilizando varios métodos para la proyección demográfica, según el tipo de población, dependiendo de las características socioeconómicas de la población:

#### a. Método aritmético

Este método es recomendado para poblaciones que aumentan a una tasa constante de crecimiento aritmético, es decir, que a la población del último censo se le

adiciona un número fijo de habitantes para cada periodo en el futuro. Este método es recomendado para pequeñas poblaciones de poco desarrollo o con áreas de crecimiento casi nulas. El método supone un crecimiento vegetativo balanceado por la mortalidad y la emigración. La ecuación para calcular la población proyectada es la siguiente:

$$Pf = P_o \left( 1 + \frac{t}{100} * i \right) \dots\dots\dots 4.3$$

o también:

$$Pf = P_o (1 + rt) \dots\dots\dots 4.4$$

**b. Método geométrico**

Este método es útil en poblaciones que muestran una actividad económica importante, que generan un desarrollo apreciable y que poseen áreas de expansión importantes las cuales pueden ser dotadas, sin mayores dificultades, de la infraestructura de servicios públicos. El crecimiento es geométrico si el aumento de la población es proporcional al tamaño de la misma. La ecuación que se emplea es:

$$P_f = P_o \left( 1 + \frac{i}{100} \right)^t \dots\dots\dots 4.5$$

o también:

$$Pf = P_o (1 + r)^t \dots\dots\dots 4.6$$

**c. Método exponencial**

La ecuación empleada por este método es la siguiente:

$$Pf = P_o * e^{\frac{i*t}{100}} \dots\dots\dots 4.7$$

Donde la tasa de crecimiento de la población ( $r=i/100$ ), la cual se calcula como el promedio de las tasas calculadas para cada par de censos, así:

$$r = \frac{\text{Ln}(Pf / P_o)}{Tf - T_o} \dots\dots\dots 4.8$$

**d. Método de Wappaus**

Es un método poco común, aunque sus resultados son confiables. Es importante aclarar que únicamente puede emplearse cuando el producto de la tasa de crecimiento (i en %), y la diferencia entre el año a proyectar y el año del censo inicial es menor a 200, es decir:

$$i * (T_f - T_o) < 200$$

De lo contrario, debido a la forma matemática de la ecuación, la población futura obtenida será creciente pero negativa.

La ecuación que se emplea para el cálculo de la proyección de población es a siguiente:

$$Pf = P_o \left( \frac{200 + i * t}{200 - i * t} \right) \dots\dots\dots 4.9$$

Donde la tasa de crecimiento (i en %) se calcula de acuerdo con el crecimiento de las poblaciones censadas y se obtiene de la siguiente expresión:

$$i = \frac{200 * (Pf - P_o)}{(Tf - T_o) * (P_o + Pf)} \dots\dots\dots 4.10$$

**e. Método de la OMS**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera una fórmula de tipo geométrico, para el caso de no disponerse de información censal utilizando una razón de crecimiento categorizado en base a la magnitud de la población (ver Tabla 48).

$$Pf = P_o (1 + P / 100)^t \dots\dots\dots 4.11$$

**Tabla 48:****Incremento Anual en %, Método de la OMS**

TIPO DE POBLACIÓN	VALOR DE P %
Ciudades Grandes	2.70
Ciudades Pequeñas	3.00
Poblados y Aldeas	2.20

**Fuente:** Organización Mundial de la Salud

En las expresiones indicadas anteriormente se tienen:

$P_f$  = Población futura, Hab.

$P_0$  = Población actual, Hab.

$r$  = Constante de crecimiento

$t$  = Periodo de diseño, a partir del año dato de la población inicial (años)

$i$  = Índice de crecimiento anual (%)

$e$  = Base de los logaritmos neperianos

**4.7.3 Caudales de diseño**

Se refiere al caudal en el periodo de diseño la misma que se estima para población futura servida.

La elección racional de caudal de diseño se basa en consideraciones de tipo hidráulico y del proceso. Las unidades de proceso y los conductos de transporte del agua residual se deben dimensionar en forma tal que permitan soportar los caudales pico que llegaran a la planta de tratamiento. Muchas de las unidades de proceso se diseñan con base en el tiempo de retención o la carga superficial (caudal por unidad de área superficial) para lograr las tasas deseadas de remoción de DBO y SST. (Crites y Tchobanoglous, 2000).

**a. Caudal doméstico**

En este caso se determinará el caudal doméstico tomando como base la población servida y las dotaciones del agua para consumo humano recomendada por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, (ver Tabla 49). (Norma OS 090, Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales)

$$Q_D = \frac{P_f \times D \times C}{86400} \dots\dots\dots 4.12$$

Donde:

- $Q_D$  = Caudal doméstico promedio, L/s
- $P_f$  = Población futura, Hab.
- $D$  = Dotación per cápita, L/Hab.día
- $C$  = Coeficiente de transformación, adimensional.

**Tabla 49:**

**Dotación de agua de consumo de habilitaciones urbanas (L/hab.día)**

ÍTEM	CLIMA	CLIMA	CLIMA
	TEMPLADO	FRÍO	CÁLIDO
Sistema con conexión	220	180	220
Lotes de área menor o igual a 90m <sup>2</sup>	150	120	150
Sistema de abastecimiento por surtidos, camión cisterna o pileta	30-50	30-50	30-50

**Fuente:** Reglamento Nacional de Edificaciones adaptado de la Norma IS.010

El caudal de contribución al alcantarillado debe ser calculado con un coeficiente de retorno (C) del 80% del caudal de agua potable consumida. (RNE, OS. 070 Redes de Aguas Residuales).

**b. Caudal mínimo ( $Q_{min}$ )**

Es de gran importancia ya que durante el diseño de algunas unidades de tratamiento es necesario conocer la velocidad que se genera con el mínimo de los caudales para evitar la sedimentación.

$$Q_{min} = K_1 \left( \frac{P_f * D * C}{86400} \right) \dots\dots\dots 4.13$$

Donde:

$$Q_{min} = \text{Caudal mínimo, L/s}$$

$K_1$  = Coeficiente de variación: 0.5 (RNE, OS. 070 Redes de Aguas Residuales).

**c. Caudal máximo diario ( $Q_{maxd}$ )**

Según (Aguero, 1997), el consumo máximo diario se define como el día de máximo consumo de una serie de registros observados durante los 365 días del año; mientras que el consumo máximo horario, se define como la hora de máximo consumo del día de máximo consumo.

Para el consumo máximo diario se considerara entre el 120% y 150% del consumo promedio diario anual ( $Q_m$ ), recomendándose el valor promedio de 130%.

$$Q_{maxd} = K_2 \left( \frac{P_f * D * C}{86400} \right) \dots\dots\dots 4.14$$

Donde:

$$Q_{maxd} = \text{Caudal máximo diario, L/s}$$

$K_2$  = Coeficiente de variación diaria: 1.3 (RNE, OS. 070 Redes de Aguas Residuales).

**d. El consumo máximo horario ( $Q_{maxh}$ )**

Se define como la hora de máximo consumo las 24 horas del día.

$$Q_{maxh} = K_3 \left( \frac{P_f * D * C}{86400} \right) \dots\dots\dots 4.15$$

Según el RNE OS. 090 (RNE, OS. 070 Redes de Aguas Residuales), el máximo anual de la demanda horaria comprende valores entre 1.8 – 2.5

Al respecto podemos indicar que en poblaciones donde el proyectista vea un franco crecimiento poblacional se asumirá el valor máximo y en poblaciones mayores donde se aprecie saturamiento se asumirá el mínimo valor u otro según su análisis.

**e. Caudal de infiltración ( $Q_{inf}$ )**

Para su cálculo es necesario tener información de la longitud de tubería utilizada para construir la red de alcantarillado sanitario de la localidad en estudio.

Según el RNE, OS. 070 (Redes de Aguas Residuales), la tasa de contribución de infiltración que depende de las condiciones locales puede ser considerado entre 0.05 – 1.0 L/(s.km), ver Tabla 50.

**Tabla 50:**  
**Valores de infiltración en tuberías**

	Caudales de infiltración (lts/km)							
	Tubo de cemento		Tubo de arcilla		Tubo de arcilla vitrificada		Tubo de P.V.C.	
<i>Unión</i>	Cemento	Goma	Cemento	Goma	Cemento	Goma	Cemento	Goma
<i>Nivel freático bajo</i>	0,5	0,2	0,5	0,1	0,2	0,1	0,1	0,05
<i>Nivel freático alto</i>	0,8	0,2	0,7	0,1	0,3	0,1	0,15	0,5

Fuente: CEPIS (2005).

$$Q_{inf} = 0.00005(l/s) * Long. tuberia(m)..... 4.16$$

**f. Caudal medio de diseño**

El caudal medio de diseño se determinará sumando el caudal promedio de aguas residuales domésticas, más el caudal de aguas ilícitas, más el caudal medio de infiltración.

$$Q_{md} = Q_{domD} + Q_{inf} ..... 4.17$$

Donde:

$Q_{md}$  = Caudal medio de diseño

$Q_D$  = Caudal domestico de diseño

$Q_{inf}$  = Caudal de infiltración

**4.7.4 Diseño de canal de entrada**

El canal de acceso o de entrada, es el canal de conducción en la cual se descarga las aguas residuales del colector para luego entregarlas a la planta.

El diseño de los canales se efectuará para las condiciones de caudal máximo horario. Se considera velocidad de aproximación usado para rejillas de limpieza manual en el rango de 0,30- 0,60 m/s.

Por la ecuación de continuidad se determinará el área transversal:

$$A = \frac{Q_{mh}}{v} ..... 4.18$$

Donde:

$Q_{mh}$ = caudal máximo horario

$v$ = velocidad de aproximación

El área transversal de flujo se define producto de base (B) por altura de canal ( $h_{canal}$ ), por consiguiente la altura se determinará por la siguiente expresión.

$$h_{canal} = \frac{A}{B} \dots\dots\dots 4.19$$

También los canales deben tener un tiempo de retención hidráulica mínima de 3 segundos y un largo mínimo de 1.35 metros para asegurar una velocidad uniforme a través de las barras.

#### 4.7.5 Diseño de rejas de limpieza manual

Las rejas se dimensionan con el criterio de tener una velocidad adecuada en la sección del flujo. Velocidades muy bajas a través de las barras, pueden contribuir en un aumento indeseable de material retenido y, también para la sedimentación de la arena en el canal de acceso. Al revés, velocidades muy grandes fomentan el arrastre de material que debería quedar retenido.

Para rejas de limpieza manual su longitud no deberá exceder de la que permita su correcta limpieza (aproximadamente 3 m). Las barras van soldadas a unos elementos de separación situadas en la cara posterior, fuera del recorrido del peine rascador.

El canal donde se ubica la reja se debe proyectar de modo que se evite la acumulación de arenas y demás materiales pesados, tanto antes como después de la reja. La pendiente del canal deberá ser horizontal o descendiente en la dirección de circulación a través de la reja. Preferentemente el canal deberá ser recto y perpendicular a la reja, con la finalidad de conseguir una distribución uniforme de sólidos en el flujo y en la reja. (Metcalf y Eddy, 1998)

Para el diseño de las rejas en la Tabla 51, se presenta algunos alcances referentes a los parámetros a considerarse.

**Tabla 51:****Parámetros de diseño para rejas de barras**

Concepto	Limpieza manual	Limpieza mecánica
Ancho de la barra, mm	5-15	5-15
Profundidad de la barra, mm	25-37.5	25-37.5
Separación entre barras, mm	25-50	15-75
Pendiente en relación a la vertical	30-45	0-30
Velocidad de Aproximación, m/s	0.3-0.6	0.6-1.1
Perdida de carga admisible, mm	150	150

**Fuente:** Ingeniería de Aguas Residuales. Metcalf y Eddy (1998)

**a. Inclinación de las barras**

En las instalaciones de limpieza manual las rejas de barras generalmente son instaladas haciendo un ángulo de 30 a 60 grados con la horizontal.

**b. Abertura o espaciamiento de las barras**

El espaciamiento libre entre las barras depende de la finalidad que se pretenda lograr (Tabla 52), para tanques Imhoff se recomienda rejas con un espaciamiento de 40 a 50 mm para que no se retenga mucha materia fecal.

**Tabla 52:****Espesores y espaciamientos de rejillas**

TIPO DE REJILLAS	BARRAS	
	ESPESOR (PULGADAS)	ESPACIAMIENTO (CENTÍMETROS)
Rejas gruesas	1/2 - 3/8	4 - 10
Rejas medias	5/16 - 3/8	2 - 4
Rejas finas	1/4 - 5/16	1 - 2

**Fuente:** Ayala y Gonzales (2008)

**c. Dimensiones de las barras**

En general las barras tienen sección rectangular de 5 a 15 mm de espesor por 30 a 75 mm de profundidad, las dimensiones dependen mucho del largo de las barras y del mecanismo de limpieza, en general las barras de rejas gruesas van hasta 15 x 75 mm (las más grandes); las instalaciones pequeñas tienen barras de sección mínima de 5 x 40 mm. Entre estos dos ejemplos hay una variedad muy grande de dimensiones que deben ser seleccionadas en función a la resistencia a la operación de limpieza y a la disponibilidad en el mercado nacional.

Ayala y Gonzales (2008) clasifican de acuerdo al tamaño de las rejas como se muestra a continuación (Tabla 53):

**Tabla 53:**

**Clasificación y tamaño de barras**

<b>TIPO</b>	<b>ANCHO POR PROFUNDIDAD (mm x mm)</b>
Rejas gruesas	10x50 – 10x60 – 13x40 – 13x50
Rejas comunes	8x50 – 10x40 – 10x50
Rejas pequeñas	6x40 – 8x40 – 10x40

**Fuente:** Ayala y Gonzales (2008)

**d. Dimensionamiento de las rejas de limpieza manual**

**Área transversal de flujo de canal**

Se determinará asumiendo la velocidad de flujo en el canal utilizando los criterios de velocidades recomendados, posteriormente, aplicando la ecuación de continuidad se tiene.

$$A_t = \frac{Q_{mh}}{V} \dots\dots\dots 4.20$$

Donde:

$Q_{mh}$ = caudal máximo horario ( $m^3/s$ )

$V$ = velocidad de flujo en el canal ( $m/s$ )

$A_t$ = área transversal total del canal ( $m^2$ )

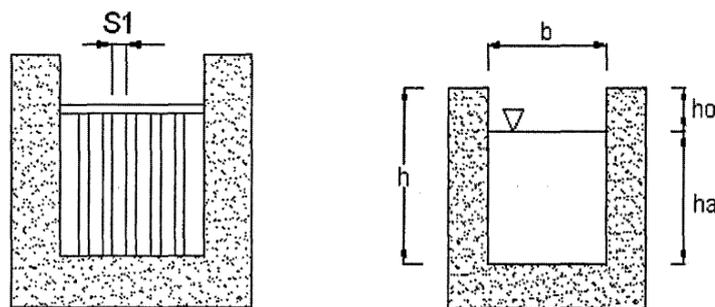
El ancho del canal de reja de barras acostumbra ser igual o más grande que el diámetro o al ancho del emisario y debe igualar el ancho de las propias rejas, evitándose espacios muertos. Por consiguiente, el tirante de agua del canal de la reja de barras será:

$$h_a = \frac{A_t}{b} \dots\dots\dots 4.21$$

Donde:

$b$  = ancho del canal (m)

$h_a$  = tirante de agua máximo del canal (m)



**Figura 63. Rejas de limpieza manual**

Fuente: Ayala y Gonzales (2008).

Se recomienda incrementar un borde libre,  $h_0$  como se muestra en la figura 63.

Para determinar el número de barras en la reja del canal ( $N_b$ ) y el número de espacios ( $N_b - 1$ ), se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$N_b = \frac{b - s_1}{e + s_1} \dots\dots\dots 4.22$$

Donde:

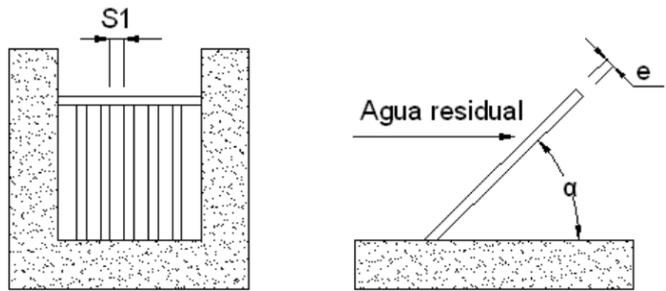
b = Base del canal donde se encuentra las rejas, m

s1 = Separación entre barras, m

e = Espesor o ancho de las barras, m

La longitud de las barras depende del grado de inclinación que tienen estas con la horizontal, y del tirante de agua máximo del canal de reja de barras que se determina de la siguiente manera:

$$L_b = \frac{h}{\text{sen}(\alpha)} \dots\dots\dots 4.23$$



**Figura 64. Inclinación de rejas de limpieza manual**  
Ayala y Gonzales (2008).

La pendiente del canal debe de ser descendente en la dirección de circulación a través de la reja (Figura 64). La pendiente del canal será determinada utilizando la ecuación de Manning.

$$S = \left( \frac{v^* n}{R_h^{2/3}} \right)^2 \dots\dots\dots 4.24$$

Donde:

S = Pendiente del canal, adimensional

R<sub>h</sub> = Radio hidráulico, m

v = Velocidad de aproximación, m/s

$n$  = Coeficiente de rugosidad de Manning para material concreto, 0.015

$$R_h = \frac{b * h_a}{b + 2h_a} \dots\dots\dots 4.25$$

**Longitud del depósito o canal**

El canal de acceso debe ser suficientemente largo para que se evite la turbulencia junto a las barras, se recomienda utilizar la siguiente expresión:

$$L = 3.50 * b \dots\dots\dots 4.26$$

Donde:

L= Longitud del depósito o canal (m)

b= Ancho útil del canal (m)

**Pérdida de carga por las rejjas**

Las pérdidas de carga que se producen al circular el agua a través de las rejjas dependen de la velocidad de aproximación del agua (velocidad de flujo en el canal donde se ubican las rejjas) y de la velocidad de circulación a través del elemento, la perdida de carga puede estimarse empleando la expresión conocida como la de Metcalf y Eddy caracterizada por su simplicidad. En general en sistemas manuales las pérdidas no deben ser mayores a 15 cm.

$$h_f = \frac{1}{0.7} x \left( \frac{V_c^2 - V^2}{2xg} \right) \dots\dots\dots 4.27$$

Donde:

$h_f$  = Perdida de carga (m)

0.7 = Coeficiente empírico que incluye los efectos de la turbulencia y de las perdidas por formación de remolinos

$V$  = Velocidad de aproximación a la reja (m/s)

$V_c$  = Velocidad de circulación entre las barras de la reja (m/s)

$g$  = Aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

Las pérdidas de carga producidas que se obtienen mediante esta ecuación que son aplicables en el caso de que las rejillas estén limpias. La obstrucción de las rejillas incrementa las pérdidas de carga.

$$V_C = \frac{Q_{mh}}{A_L} \dots\dots\dots 4.28$$

Las áreas de espacios libres se definen con la siguiente expresión:

$$A_L = h_a [b - (N_b * e)] \dots\dots\dots 4.29$$

Donde:

$Q_{mh}$  = Caudal máximo horario de diseño ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A_L$  = Área transversal de flujo de la rejilla de barras ( $\text{m}^2$ )

$e$  = Espesor de barras (transversal al caudal que fluye) (m)

#### e. Disposición final de los sólidos gruesos

Oakley (2011) sin duda los desechos gruesos están contaminados con patógenos, y son excesivamente nocivos con malos olores y malas apariencias. Deberán ser enterradas diariamente con el mínimo manejo por el operador de la instalación. El diseño de la instalación de pretratamiento debe incluir un área reservada cerca a la rejilla, donde el operador pueda enterrar los sólidos gruesos.

#### 4.7.6 Diseño del desarenador de flujo horizontal

Tiene por objeto separar del agua cruda la arena y partículas en suspensión gruesa, con el fin de evitar se produzcan depósitos en las obras de conducción, proteger las bombas de la abrasión y evitar sobrecargas en los procesos posteriores de tratamiento. El desarenado se refiere normalmente a la remoción de las partículas superiores a  $0,2 \text{ mm}$  (CEPIS, 2005).

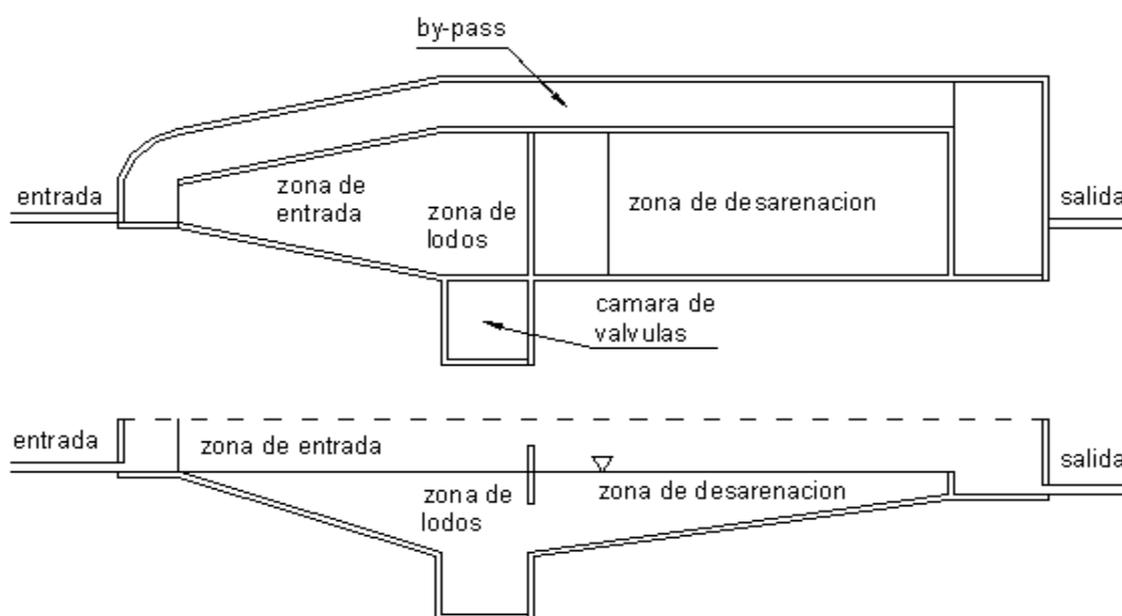
### a) Principio de funcionamiento.

Las condiciones dinámicas de una corriente líquida, en especial la turbulencia, son responsables por el transporte de partículas sólidas más densas que el agua. Esas partículas son conducidas en suspensión o son arrastradas por atracción junto al fondo de los canales o tuberías.

Normalmente, la ubicación de los desarenadores antes del bombeo del agua residual, en los casos en los que resulte conveniente, comportara la instalación de los mismos a una profundidad considerable, lo cual implicara un coste adicional. Por ello, se suele considerar como más económico bombear el agua residual, incluidas las arenas, hasta los desarenadores situadas en un lugar conveniente en relación a la posición de las restantes unidades de las planta, a sabiendas de la mayor labor de mantenimiento que hay que realizar en las bombas.

### b) Desarenador de flujo horizontal.

Los desarenadores de flujo horizontal están compuestos por cuatro partes, como se muestra en la figura 65:



**Figura 65. Esquema de un desarenador de flujo horizontal**

Fuente: Ayala y Gonzales (2008).

**Zona de entrada**

Tiene como función el conseguir una distribución uniforme de las líneas de flujo dentro de la unidad, uniformizando a su vez la velocidad.

**Zona de desarenación**

Parte de la estructura en la cual se realiza el proceso de depósito de partículas por acción de la gravedad.

**Zona de salida**

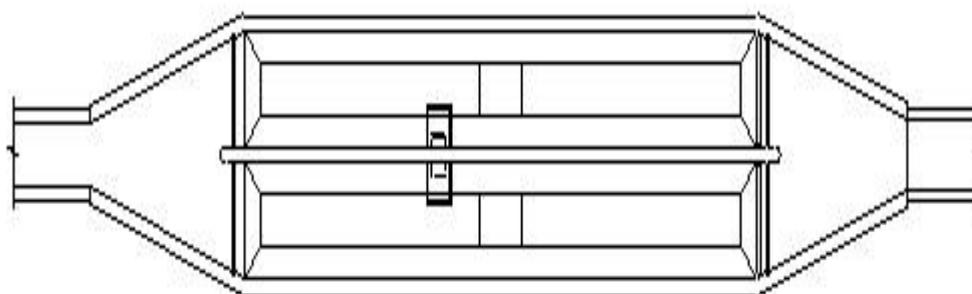
Conformada por un vertedero de rebose diseñado para mantener una velocidad que no altere el reposo de la arena sedimentada.

**Zona de depósito y eliminación de la arena sedimentada**

Constituida por una tolva con pendiente mínima de 10% que permita el deslizamiento de la arena hacia el canal de limpieza de los sedimentos.

**c) Criterios de diseño para desarenadores de flujo horizontal.****Número de unidades y "By-Pass".**

De acuerdo con el Reglamento Nacional de Edificaciones, se dimensionan como mínimo dos desarenadores en paralelo cada uno de ellos calculado para el caudal máximo horario. Una se mantiene en operación y la otra en "stand by" para realizar la limpieza de las arenas removidas o su reparación, los desarenadores son obligatorios en las plantas que tienen sedimentadores y digestores (ver Figura 66).



**Figura 66. Desarenador de dos unidades en paralelo (vista en planta)**

Fuente: Ayala y Gonzales (2008).

**Velocidad de flujo en los desarenadores.**

En los canales de remoción de arena la velocidad recomendable es del orden de 0.30 a 0.40 m/s, velocidades inferiores a 0.30 m/s causan la deposición simultánea de cantidades relativamente grandes de materia orgánica, y velocidades mayores a 0.40 m/s causan el arrastre del material sedimentado. Por esto se debe procurar controlar y mantener la velocidad de flujo alrededor de 0,30 m/s con una tolerancia de  $\pm 20 \%$ .

**Área de los desarenadores.**

Destinándose a la sedimentación de partículas granulares discretas, los desarenadores pueden ser dimensionados por la teoría de sedimentación de Hazen. Como la experiencia indica que las partículas de arena nocivas son las de tamaño igual o superior a 0.2 mm, cuyo peso específico es de  $2.65 \text{ g/cm}^3$  y velocidad de sedimentación del orden de 2.0 cm/s, se constata que los desarenadores deben ser diseñados con tasas de aplicación de 600 a  $1,200 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$ . El reglamento nacional de edificaciones señala valores de tasas de aplicación de 1000 a  $1600 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$ , estos valores permiten determinar el área necesaria para los desarenadores.

**Profundidad de la lámina líquida.**

En los desarenadores de tipo "canal" la profundidad del agua para el caudal mínimo, medio y máximo es determinada partiéndose de las condiciones de funcionamiento del controlador de velocidad (vertedero de salida). Cada vertedero tiene su ecuación que relaciona la altura del agua con el caudal.

**Angulo de Transición.**

El objetivo de estas obras, es reducir las pérdidas de carga debidas al cambio de sección del canal o de la pendiente del mismo. El Bureau of Reclamation, recomienda

un ángulo de  $12^{\circ}30'$  en aquellas estructuras donde las pérdidas de carga deben reducirse al mínimo (Ayala y Gonzales, 2008).

#### **d) Diseño hidráulico para desarenadores de flujo horizontal.**

Pueden considerarse tres tipos de mecanismo o procesos de sedimentación, dependiendo de la naturaleza de los sólidos en suspensión.

**Sedimentación discreta:** Las partículas que se depositan mantienen su individualidad, o sea, no se somete a un proceso de coalescencia con otras partículas. En este caso, las propiedades físicas de las partículas (tamaño, forma, peso específico) no cambian durante el proceso. La deposición de partículas de arena en los desarenadores es un ejemplo típico de sedimentación discreta.

**Sedimentación con floculación:** La aglomeración de las partículas va acompañada de cambios en la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación. La sedimentación que se lleva a cabo en los clarificadores o sedimentadores primarios es un ejemplo de este proceso.

**Sedimentación por zonas:** Las partículas forman una especie de manto que sedimenta como una masa total presentando una interface distinta con la fase líquida. Ejemplos de este proceso incluyen la sedimentación de lodos activos en los clarificadores secundarios y la de los floculos de alumina en los procesos de tratamiento de aguas.

#### **e) Teoría de la sedimentación discreta.**

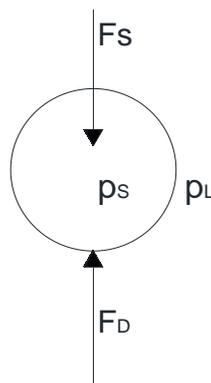
El fundamento para la sedimentación de las partículas discretas es la ley de Newton, que se basa en la suposición de que las partículas son esféricas con diámetros homogéneos. Cuando una partícula se sedimenta, va acelerándose hasta que las fuerzas que provocan la sedimentación, en particular el peso efectivo de la partícula, se equilibran con las resistencias o fuerzas de fricción ofrecidas por el líquido. Cuando se

llega a este equilibrio, la partícula alcanza una velocidad de sedimentación constante, denominada velocidad final de sedimentación de la partícula (ver Figura 68).

Si consideramos la partícula de la figura, que ha alcanzado su velocidad final, puede escribirse el equilibrio de fuerzas correspondiente. La fuerza que provoca la sedimentación, en este caso el peso efectivo de la partícula, es la diferencia entre su peso y el empuje hidrostático:

$$F_s = v \rho_s g - v \rho_L g = (\rho_s - \rho_L) g v \quad \dots\dots\dots 4.30$$

Donde  $F_s$  es el peso efectivo de la partícula;  $\rho_s$  es la densidad de la partícula;  $\rho_L$  es la densidad del líquido;  $g$  es la aceleración de la gravedad; y  $v$  el volumen de la partícula,  $1/6 \pi d^3$ , donde  $d$  es el diámetro de la partícula esférica (ver Figura 67).



**Figura 67. Sedimentación de una partícula.**

Fuente: Ayala y Gonzales (2008).

La fuerza de resistencia que trata de impedir la sedimentación es:

$$F_D = C_d A \left( \frac{\rho_L V^2}{2} \right) \quad \dots\dots\dots 4.31$$

En donde  $F_D$  es la fuerza de resistencia;  $C_d$  es el coeficiente de fricción;  $A$  es el área proyectada de la partícula,  $A= 1/4 \pi d^2$ ; y  $V$  es la velocidad relativa entre la partícula y el fluido. Para las condiciones que definen la velocidad final de sedimentación,  $F_s = F_D$ , con lo que las ecuaciones dan:

$$(\rho_s - \rho_L) g v = C_d A \left( \frac{\rho_L V_s^2}{2} \right) \dots\dots\dots 4.32$$

$$\frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} = S - 1 \quad \text{siendo } S \text{ la gravedad especificade los granos (para arenas 2.65)}$$

$V = V_s =$  velocidad de sedimentacion

Sustituyendo  $v = 1/6 \pi d^3$ ,  $A = 1/4 \pi d^2$ , resolviendo esta ecuación para la velocidad final, se obtiene la ecuación general de sedimentación para partículas discretas que es la ley de Newton:

$$V_s = \sqrt{\frac{4 \times g \times d \times (S - 1)}{3 \times c_d}} \dots\dots\dots 4.33$$

$d =$  Diámetro de la partícula (m.)

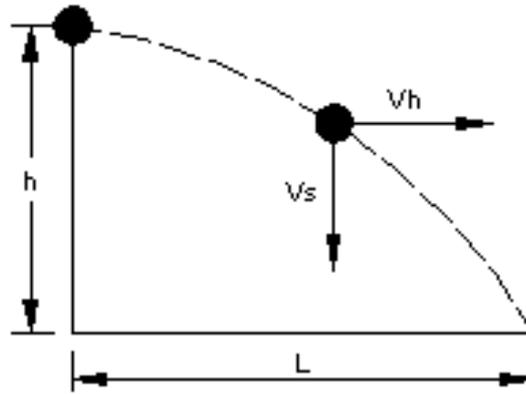
$S =$  Gravedad especifica de las partículas (2.65 para arenas)

$g =$  Aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$v =$  Viscosidad cinemática del agua (1.32x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s. a 10 °C en agua limpia)

$c_d =$  Coeficiente de resistencia de las partículas

El procedimiento que se presenta a continuación es válido para partículas discretas las cuales durante la sedimentación no alteran su tamaño, forma o peso es decir no existe interacción sustancial con las partículas vecinas. Un buen método de resolución consiste en determinar la velocidad de sedimentación, suponiendo que el régimen de flujo que predomina inicialmente es flujo laminar el cual es comprobado con el número de Reynolds, si lo supuesto no es correcto se prosigue con el régimen de flujo turbulento y por último se verifica al régimen de flujo en transición que es el caso más común.



**Figura 68. Modelo de sedimentación de una partícula de arena**

Fuente: Ayala y Gonzales (2008)

Dónde:

$V_h$ = Velocidad horizontal (m/s.)

$V_s$ = Velocidad de sedimentación (m/s.)

$L$ = Longitud específica del desarenador (m.)

$h$ = Profundidad de sedimentación (m.)

**f) Determinación de la velocidad de sedimentación.**

Se determina la velocidad de sedimentación de acuerdo a los criterios indicados anteriormente en relación a los diámetros de las partículas. Como primera aproximación utilizamos la ley de Stokes, sedimentación de la partícula en régimen de flujo laminar ( $Re < 1$ ), reemplazando  $C_d$  igual a  $24/Re$  en la ecuación general de sedimentación para partículas discretas se obtiene la ley de Stokes:

$$V_s = \frac{(S - 1) \times g \times d^2}{18 \times \nu} \dots\dots\dots 4.34$$

Se comprueba el número de Reynolds:

$$Re = \frac{V_s \times d}{\nu} \dots\dots\dots 4.35$$

En caso que el número de Reynolds no cumpla para la aplicación de la ley de Stokes ( $Re < 1$ ), se realizará un reajuste al valor de la velocidad de sedimentación ( $V_s$ ) considerando la sedimentación de la partícula en régimen turbulento ( $Re > 2000$ ) rige la ley de Newton. La cual se obtiene reemplazando el valor de  $C_d$  igual a 0.5 para granos redondos en la ecuación general de sedimentación:

$$V_s = \sqrt{2.66 \times g \times d \times (S - 1)} \dots\dots\dots 4.36$$

En caso que el número de Reynolds no cumpla para la aplicación de la ley de Newton ( $Re > 2000$ ), se realizará un reajuste al valor de  $V_s$  considerando la sedimentación de la partícula en régimen de transición mediante la ley de Allen. Sedimentación de la partícula en régimen de flujo en transición ( $1 < Re < 2000$ ):

$$c_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \dots\dots\dots 4.37$$

La velocidad horizontal critica de arrastre en el tanque según “Camp” es:

$$V_d = a \times \sqrt{d} \dots\dots\dots 4.38$$

Dónde:

$V_d$ = Velocidad critica (cm/s.).

$a$ = Constante en función del diámetro (Tabla 54).

$d$ = Diámetro de la partícula (mm).

Además la velocidad horizontal:

$$V_h = V_d = \frac{Q_{maxh}}{A_{transversal}} \dots\dots\dots 4.39$$

Donde:

$Q_{maxh}$ = Caudal máximo horario ( $m^3/s$ )

$A_{transversal}$ = Área transversal de flujo del desarenador ( $m^2$ )

**Tabla 54:****Valores del coeficiente “a”**

	<b>Diámetro</b>
36	$d > 1\text{mm}$
44	$1\text{mm} > d > 0.1\text{mm}$
51	$d < 0.1\text{mm}$

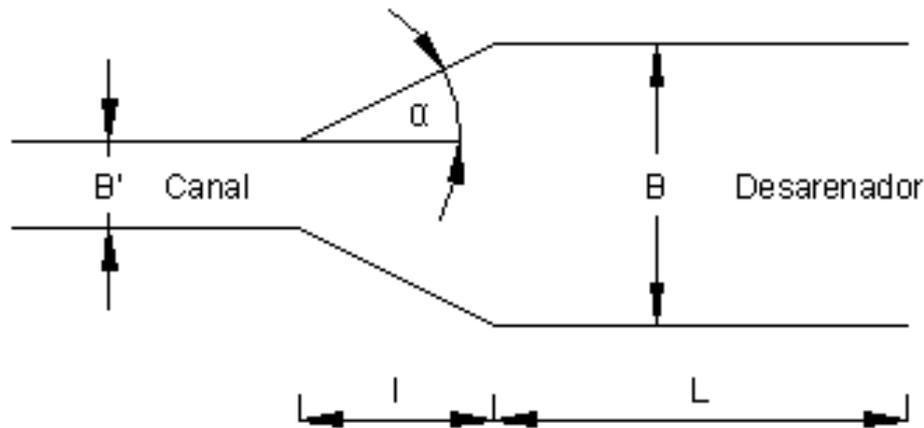
**Fuente:** Ayala y Gonzales (2008).

**g) Determinación de las dimensiones del desarenador**

La longitud teórica del canal desarenador (L) está dada por la profundidad que requiere la velocidad de sedimentación y la sección de control. El Reglamento técnico de Diseño Para Unidades de Tratamiento No Mecanizadas de Agua Potable y Aguas Residuales recomienda que la longitud del desarenador oscile entre 15 h a 25 h. Para determinar el largo necesario para los canales de retención de arena se puede emplear la siguiente ecuación aplicando la teoría de simple sedimentación:

$$L = \frac{V_d \times h}{V_s - 0.04 \times V_d} \dots\dots\dots 4.40$$

Es necesario preveer una longitud adicional para incluir el efecto de la turbulencia que se produce en la entrada y en la salida del canal desarenador. Metcalf y Eddy recomienda un incremento mínimo del 50 % de la longitud teórica prevista. Para evitar que el paso de una sección a la siguiente, de dimensiones y características diferentes, se realice de un modo brusco, hay que preveer un tramo de transición bien diseñado y así lograr una corriente de flujo tranquila uniforme en el desarenador (ver Figura 69).



**Figura 69. Esquema de un desarenador**

Fuente: Ayala y Gonzales (2008).

Dónde:

L= Longitud específica del desarenador (m.)

l= Longitud de transición (m.)

B= Ancho del desarenador (m.)

B'= Ancho del canal (m.)

α= Angulo de ensanchamiento gradual de la transición (grados)

$$l = \frac{B - B'}{2 \tan(\alpha)} < \frac{L}{3} \quad \dots\dots\dots 4.41$$

En el proyecto de diseño de desarenadores de flujo horizontal debe verificarse que bajo las condiciones más adversas, la partícula de arena más ligera alcance el fondo del canal antes de llegar al extremo del mismo es decir de cumplirse que:

$$T_d > T_s \quad \dots\dots\dots 4.42$$

El periodo teórico de detención ( $T_s$ ), es el tiempo que precisa una partícula de arena, para depositarse en el fondo del canal desde el instante que ingresa en la cámara desarenadora, se denomina también tiempo de sedimentación.

El periodo de desplazamiento ( $T_d$ ), es el tiempo que emplea un volumen unitario de fluido para alcanzar el canal de salida del desarenador desde que entra en el mismo.

$$T_s = \frac{h}{V_s} \quad T_d = \frac{L}{V_d} \quad \dots\dots\dots 4.43$$

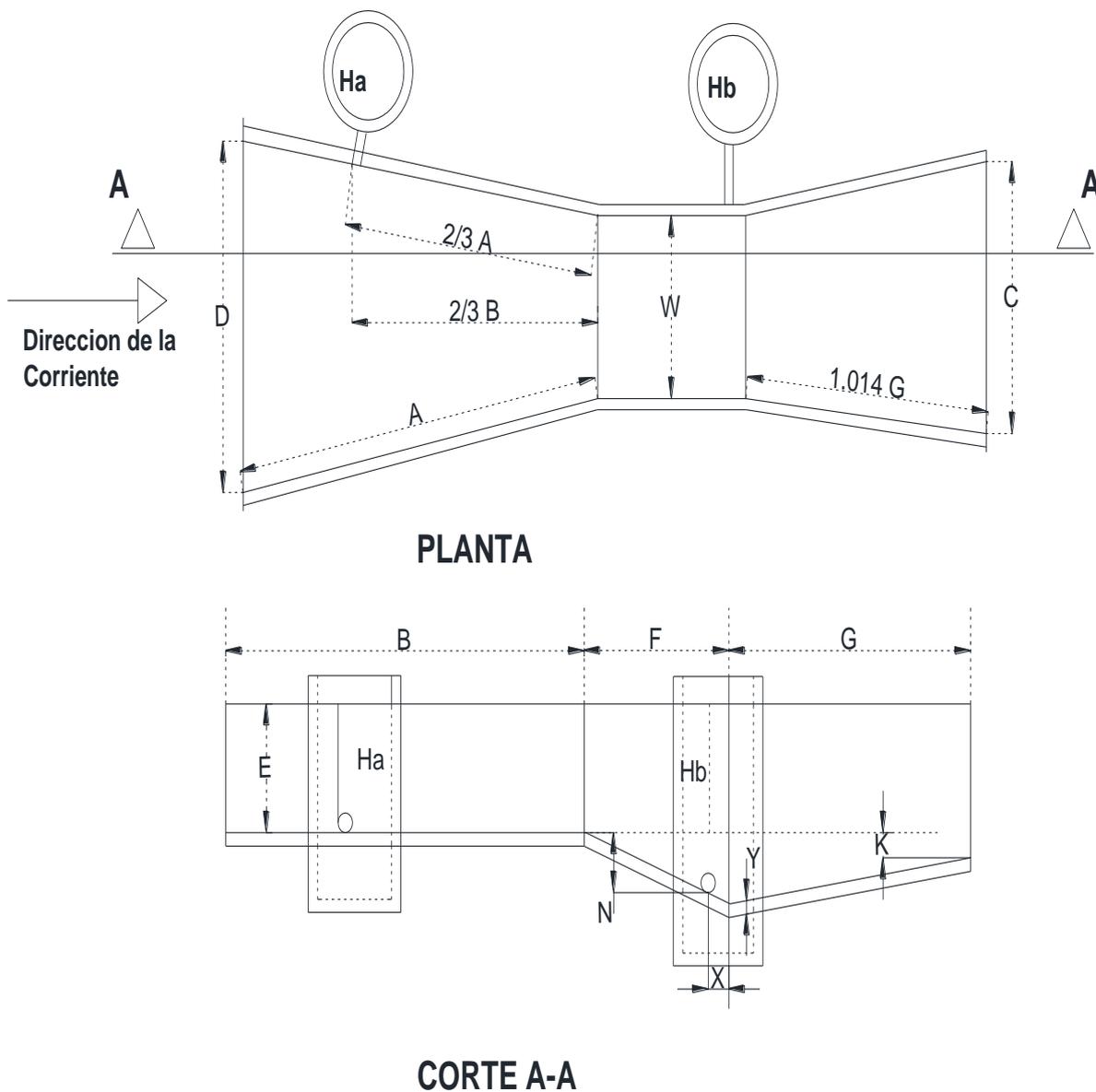
#### **h) Disposición final de sólidos arenosos**

Los sólidos arenosos, como los sólidos gruesos, siempre estarán contaminados con patógenos y el operador necesita mucho cuidado cuando es necesario limpiar el desarenador. Se debe enterrar todos los sólidos arenosos inmediatamente después de sacarlos con el mínimo de manejo. El diseño de pretratamiento debe incluir un área reservada para la disposición final de los sólidos arenosos.

#### **4.7.7 Canaleta parshall.**

El aforador de flujo crítico conocido es la canaleta Parshall, introducida en 1920 por R. L. Parshall. Está constituido por tres partes fundamentales que son: la sección convergente o de entrada, la garganta y la sección divergente o de salida, La primera está formada por dos paredes verticales simétricas y convergentes, y de un fondo, plantilla que es horizontal: la garganta está formada por dos paredes también verticales pero paralelas, y el fondo es inclinado hacia abajo con una pendiente de 2.67:1. La salida, por dos paredes verticales divergentes y el fondo es ligeramente inclinado hacia arriba. Hay que hacer notar que tanto las paredes como el fondo son planos, y a la arista que se forma por la unión del fondo de la entrada y el de la garganta se le llama Cresta del Medidor y a su longitud (o sea la distancia entre las paredes de la garganta) se le llama Tamaño del Medidor y se le designa por la letra W. En la figura 70 se muestra un medidor en donde están acotadas sus dimensiones conservando prácticamente las mismas notaciones usadas por Parshall.

Tanques de reposo para medir las cargas



**Figura 70. Esquema de medidor Parshall.**

Fuente: Elaboración propia

Donde:

**W** : Ancho de la garganta en pies o metros

**A** : Longitud de la pared lateral de la sección convergente

**2/3 A** : Distancia desde el final de la cresta hasta el punto de medición

**B** : Longitud axial de la sección convergente o de entrada

- C** : Ancho del extremo de aguas debajo de la canaleta
- D** : Ancho del extremo de aguas arriba de la canaleta.
- E** : Profundidad de la canaleta.
- F** : Longitud de la garganta.
- G** : Longitud de la sección divergente o de salida
- K** : Diferencia de nivel entre el punto más bajo de la canaleta y la cresta
- N** : Profundidad de la depresión en la garganta debajo de la cresta
- R** : Radio de la curvatura de las paredes curvas
- X** : Distancia horizontal desde el punto más bajo de la garganta hasta el punto de medición.
- Y** : Distancia vertical desde el punto más bajo de la garganta hasta el punto de medición.

**a. Dimensionamiento del canal Parshall**

El objetivo de la canaleta Parshall es servir como estructura de aforo, es decir, permitir medir el caudal de agua residual que ingresa diariamente a la PTAR con el fin de llevar una medición y a su vez un mejor control de los proceso. El dimensionamiento parte de los caudales máximo y mínimo de agua residual (ver Tabla 55, Tabla 56 y Tabla 57).

**Tabla 55:**

**Características de descarga de canales Parshall (Ackers, 1978)**

ANCHO DE GARGANTA  w, en mm	INTERVALO DE DESCARGA		ECUACIÓN DEL GASTO.	INTERVALO DE CARGA HIDRÁULICA		LÍMITE MODULAR hb/ha,
			Q, en m <sup>3</sup> /s			
	MÍNIMO MÁXIMO		ha, en m	MÍNIMO MÁXIMO		
	Q, (l/s)	Q, (l/s)		h1, en m	h1, en m	
76.2	0.77	32.1	0.177 ha <sup>1.550</sup>	0.030	0.33	0.5
152.4	1.50	111.1	0.3812 ha <sup>1.580</sup>	0.030	0.45	0.6
228.6	2.50	251.0	0.5354 ha <sup>1.530</sup>	0.030	0.61	0.6
304.8	3.32	457.0	0.6909 ha <sup>1.520</sup>	0.030	0.76	0.7
457.2	4.80	695.0	1.0560 ha <sup>1.538</sup>	0.030	0.76	0.7
609.6	12.10	937.0	1.4280 ha <sup>1.550</sup>	0.046	0.76	0.7
914.4	17.60	1427.0	2.1840 ha <sup>1.566</sup>	0.046	0.76	0.7
1219.2	35.80	1923.0	2.9530 ha <sup>1.578</sup>	0.060	0.76	0.7
1524.0	44.10	2424.0	3.7320 ha <sup>1.587</sup>	0.76	0.76	0.7
1828.8	74.10	2929.0	4.5190 ha <sup>1.595</sup>	0.76	0.76	0.7
2133.6	85.80	3438.0	5.3120 ha <sup>1.601</sup>	0.76	0.76	0.7
2438.4	97.20	3949.0	6.1120 ha <sup>1.607</sup>	0.76	0.76	0.7

**Fuente:** Valdez y Vázquez (2003).

El valor se obtiene de la tabla 58, para distintos anchos de garganta W, en base a los caudales máximo y mínimo.

Se plantea que el Parshall, trabaje con descarga libre, se procede a determinar las cargas Ha y Hb, con ello definir su comportamiento. Para tal efecto el valor del grado de sumergencia S, está dado por la expresión:

$$S = H_b / H_a \dots\dots\dots 4.44$$

**Donde:**

**Ha:** carga a la entrada del canal Parshall

**Hb:** carga cerca del extremo inferior en la garganta del Parshall

**b. Grado de sumersión**

El valor del grado de sumersión para descarga libre y sumergida varía en función del ancho de garganta.

**Tabla 56:**

**Tamaño del Medidor**

TAMAÑO DEL MEDIDOR	DESCARGA LIBRE	CON SUMERSIÓN
W < 0.30 m.	S < 0.6	0.60 < S < 0.95
0.30 < W < 2.50 m.	S < 0.7	0.70 < S < 0.95
2.50 < W < 15.00 m.	S < 0.8	0.80 < S < 0.95

**Fuente:** (Romero, 2001)

Entonces el valor de sumergencia para descarga libre es de 0.6.

Para obtener el valor de la carga Hb es necesario primeramente conocer el valor de Ha, el cual se puede determinar con el caudal que circulará a través del Parshall mediante la siguiente expresión:

$$Q = mH^S \dots\dots\dots 4.45$$

**Donde:**

m y S: Constantes que varían en función de W, en la Tabla 58 se especifican las fórmulas para evaluar el gasto en función de estas.

Al despejar se tiene:

$$Ha = \sqrt[5]{\frac{Q}{m}} \dots\dots\dots 4.46$$

Para  $Ha_{max}$ : Carga correspondiente al caudal máximo o de diseño

$$Ha_{max} = \sqrt[5]{\frac{Q_{md}}{m}} \dots\dots\dots 4.47$$

Para  $Ha_{min}$ : Carga correspondiente al caudal mínimo o de diseño

$$Ha_{min} = \sqrt[5]{\frac{Q_{min}}{m}} \dots\dots\dots 4.48$$

Por otro lado, para hallar el valor de Z, se tiene:

$$\frac{H_{max} - Z}{H_{min} - Z} = \frac{Q_{max}}{Q_{min}} \dots\dots\dots 4.49$$

**Tabla 57:**  
**Dimensiones de medidores Parshall.**

W	A	B	C	D	E	F	G	K	N	R	M	P	X	Y
in	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
1 "	2.50	36.30	35.60	9.30	16.80	22.90	7.60	20.30	1.90	2.90		50.00	0.80	1.30
2 "	5.10	41.40	40.60	13.50	21.40	35.60	11.40	25.40	2.20	4.30		70.00	1.60	2.50
3 "	7.60	46.60	45.70	17.80	25.90	38.10	15.20	30.50	2.50	5.70	40.60	76.80	2.50	3.80
6 "	15.20	62.10	61.00	39.40	40.30	45.70	30.50	61.00	7.60	11.40	40.60	90.20	5.10	7.60
9 "	22.90	88.00	86.40	38.00	57.50	61.00	30.50	45.70	7.60	11.40	40.60	108.00	5.10	7.60
12 "	30.50	137.20	134.40	61.00	84.50	91.50	61.00	91.50	7.60	22.90	50.80	149.20	5.10	7.60
18 "	45.70	144.90	142.00	76.20	102.60	91.50	61.00	91.50	7.60	22.90	50.80	167.60	5.10	7.60
24 "	61.00	152.50	149.60	91.50	120.70	91.50	61.00	91.50	7.60	22.90	50.80	185.40	5.10	7.60
36 "	91.50	167.70	164.50	122.00	157.20	91.50	61.00	91.50	7.60	22.90	50.80	222.30	5.10	7.60
48 "	122.00	183.00	179.50	152.50	193.80	91.50	61.00	91.50	7.60	22.90	61.00	271.10	5.10	7.60
60 "	152.50	198.30	194.10	183.00	230.30	91.50	61.00	91.50	7.60	22.90	61.00	308.00	5.10	7.60
72 "	182.80	213.50	209.00	213.50	266.70	91.50	61.00	91.50	7.60	22.90	61.00	344.20	5.10	7.60
84 "	213.50	228.80	224.00	244.00	303.00	91.50	61.00	91.50	7.60	22.90	61.00	381.00	5.10	7.60
96 "	244.00	244.00	239.20	274.50	340.00	91.50	61.00	91.50	7.60	22.90	61.00	417.20	5.10	7.60
120 "	305.00	274.50	427.00	366.00	475.90	122.00	91.50	183.00	15.30	34.30			30.50	22.90

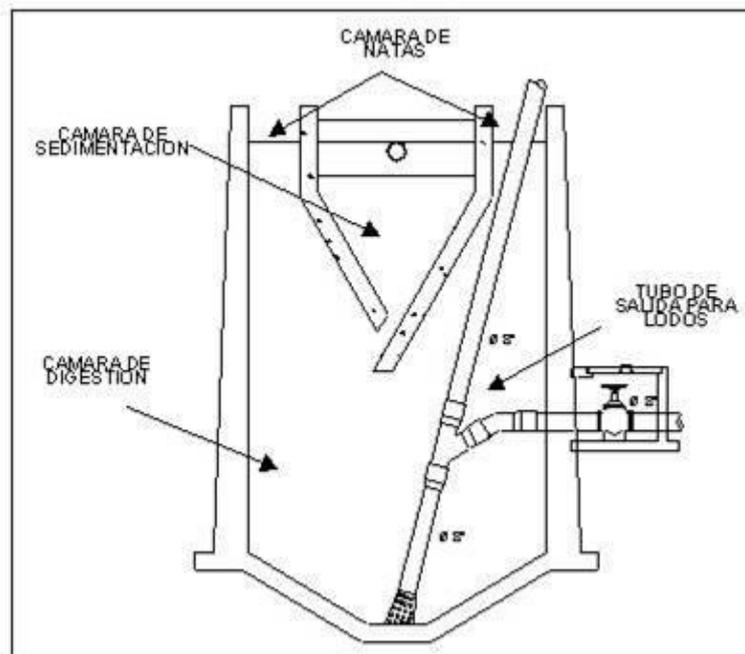
**Fuente:** Valdez y Vázquez (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*

**4.7.8 Diseño de tanque imhoff**

Para el dimensionamiento de tanque imhoff se tomarán en consideración los criterios de la Norma OS 090 “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales” del Reglamento Nacional de Edificaciones.

El tanque Imhoff típico es de forma rectangular y se divide en tres compartimientos, ver Figura 71:

- a) Cámara de sedimentación.
- b) Cámara de digestión de lodos.
- c) Área de ventilación y cámara de natas.



**Figura 71. Tanque Imhoff**

Fuente: CEPIS (2005)

**a. Diseño del sedimentador**

**Caudal de diseño, m3/hora**

$$Q_p = \frac{\text{Poblacion} * \text{Dotacion}}{1000} * \% \text{ contribucion} \dots\dots\dots 4.50$$

Dotación en litro/hab/día.

**Área del sedimentador (As, en m2).**

$$A_s = \frac{Qp}{C_s} \dots\dots\dots 4.51$$

Donde:

Cs: Carga superficial, igual a 1 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*hora).

**Volumen del sedimentador (Vs, en m3).**

$$V_s = Qp * R \dots\dots\dots 4.52$$

R: Periodo de retención hidráulica, entre 1,5 a 2,5 horas (recomendable 2 horas).

- El fondo del tanque será de sección transversal en forma de V y la pendiente de los lados respecto a la horizontal tendrá de 50° a 60°.
- En la arista central se debe dejar una abertura para paso de los sólidos removidos hacia el digestor, esta abertura será de 0,15 a 0,20 m.
- Uno de los lados deberá prolongarse, de 15 a 20 cm, de modo que impida el paso de gases y sólidos desprendidos del digestor hacia el sedimentador, situación que reducirá la capacidad de remoción de sólidos en suspensión de esta unidad de tratamiento.

**Longitud mínima del vertedero de salida (Lv, en m).**

$$L_v = \frac{Q_{md}}{C_{hv}} \dots\dots\dots 4.53$$

Donde:

Qmd : Caudal máximo diario de diseño, en m3/día.

Chv : Carga hidráulica sobre el vertedero, estará entre 125 a 500 m3/(m\*día),  
(recomendable 250, OPS/CEPIS, 2005).

**b. Diseño del digestor**

**Volumen de almacenamiento y digestión (Vd, en m3).**

Para el compartimiento de almacenamiento y digestión de lodos (cámara inferior) se tendrá en cuenta la siguiente Tabla 58:

**Tabla 58:**

**Relación de temperatura con respecto al factor de capacidad relativa**

Temperatura °C	Factor de capacidad relativa (fcr)
5	2,0
10	1,4
15	1,0
20	0,7
>25	0,5

**Fuente:** Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización – OPS (2005)

$$Vd = \frac{70 * P * fcr}{1000} \dots\dots\dots 4.54$$

Donde:

fcr : factor de capacidad relativa

P : Población.

- El fondo de la cámara de digestión tendrá la forma de un tronco de pirámide invertida (tolva de lodos), para facilitar el retiro de los lodos digeridos.
- Las paredes laterales de esta tolva tendrán una inclinación de 15° a 30° con respecto a la horizontal.
- La altura máxima de los lodos deberá estar 0,50 m por debajo del fondo del sedimentador.

Para determinar el tiempo de digestión en días se utilizará la Tabla 59.

**Tabla 59:**

**Relación de temperatura con respecto al tiempo de digestión de lodos**

Temperatura °C	Tiempo de digestión en días
5	110
10	76
15	55
20	40
>25	30

**Fuente:** Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización – OPS (2005)

**Frecuencia del retiro de lodos**

Los lodos digeridos deberán retirarse periódicamente, para estimar la frecuencia de retiros de lodos se usarán los valores consignados en la tabla 62.

La frecuencia de remoción de lodos deberá calcularse en base a estos tiempo referenciales, considerando que existirá una mezcla de lodos frescos y lodos digeridos; estos últimos ubicados al fondo del digestor. De este modo el intervalo de tiempo entre extracciones de lodos sucesivas deberá ser por lo menos el tiempo de digestión a excepción de la primera extracción en la que se deberá esperar el doble de tiempo de digestión.

**Extracción de lodos**

- El diámetro mínimo de la tubería para la remoción de lodos será de 200 mm y deberá estar ubicado 15 cm por encima del fondo del tanque.
- Para la remoción se requerirá de una carga hidráulica mínima de 1,80 m.

### c. Área de ventilación y cámara de natas

Para el diseño de la superficie libre entre las paredes del digestor y el sedimentador (zona de espuma o natas) se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- El espaciamiento libre será de 1,0 m como mínimo.
- La superficie libre total será por lo menos 30% de la superficie total del tanque.
- El borde libre será como mínimo de 0,30 cm.

### 4.7.9 Lechos de secados de lodos

Los lechos de secado de lodos son generalmente el método más simple y económico de deshidratar los lodos estabilizados (lodos digeridos), lo cual resulta lo ideal para pequeñas comunidades.

#### a. Carga de sólidos que ingresa al sedimentador (C, en Kg de SS/día).

$$C = Q * SS * 0.0864 \quad \dots\dots\dots 4.55$$

Donde:

SS: Sólidos en suspensión en el agua residual cruda, en mg/l.

Q: Caudal promedio de aguas residuales.

A nivel de proyecto se puede estimar la carga en función a la contribución per cápita de sólidos en suspensión, de la siguiente manera:

$$C = \frac{\text{Poblacion} * \text{contribucion percapita}(\text{grSS} / \text{hab} * \text{dia})}{1000} \quad \dots\dots\dots 4.56$$

En las localidades que cuentan con el servicio de alcantarillado, la contribución per cápita se determina en base a una caracterización de las aguas residuales.

Cuando la localidad no cuenta con alcantarillado se utiliza una contribución per cápita promedio de 90 gr.SS/(hab\*día).

**b. Masa de sólidos que conforman los lodos (Msd, en Kg SS/día).**

$$Msd = (0.5 * 0.7 * 0.5 * C) + (0.5 * 0.3 * C) \dots\dots\dots 4.57$$

**c. Volumen diario de lodos digeridos (Vld, en litros/día).**

$$Vld = \frac{Msd}{\rho_{lodo} * (\% \text{ solidos}/100)} \dots\dots\dots 4.58$$

Donde:

$\rho_{lodo}$ : Densidad de los lodos, igual a 1,04 Kg/l.

% de sólidos: % de sólidos contenidos en el lodo, varía entre 8 a 12%.

**d. Volumen de lodos a extraerse del tanque (Vel, en m3).**

$$Vel = \frac{Vld * Td}{1000} \dots\dots\dots 4.59$$

Donde:

Td: Tiempo de digestión, en días

**e. Área del lecho de secado (Als, en m2).**

$$Als = \frac{Vel}{Ha} \dots\dots\dots 4.60$$

Donde:

Ha: Profundidad de aplicación, entre 0,20 a 0,40m

- El ancho de los lechos de secado es generalmente de 3 a 6 m., pero para instalaciones grandes puede sobrepasar los 10 m.

- Alternativamente se puede emplear la siguiente expresión para obtener las dimensiones unitarias de un lecho de secado.

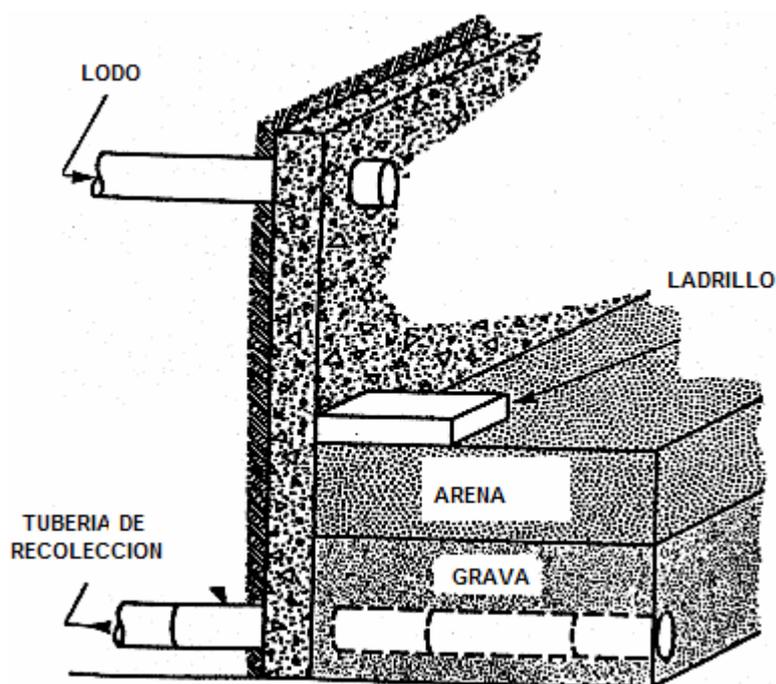
$$\frac{\text{Rendimiento volumetrico del digester}(m^3 / \# \text{ de personas})}{\text{Numero de aplicaciones(años)} * \text{profundidad de inundacion}(m)} = \frac{m^2 \text{ de lecho}}{\text{habitante}} \dots\dots\dots 4.61$$

Considerando el número de aplicaciones al año, verificar que la carga superficial de sólidos aplicado al lecho de secado se encuentre entre 120 a 200 Kg de sólidos/(m<sup>2</sup>\*año).

#### f. Medio de Drenaje

El medio de drenaje es generalmente de 0,30 m de espesor y debe tener los siguientes componentes:

- El medio de soporte recomendado está constituido por una capa de 15 cm. Formada por ladrillos colocados sobre el medio filtrante, con una separación de 2 a 3 cm. llena de arena.
- La arena es el medio filtrante y debe tener un tamaño efectivo de 0,3 a 1,3 mm., y un coeficiente de uniformidad entre 2 y 5.
- Debajo de la arena se deberá colocar un estrato de grava graduada entre 1,6 y 51 mm (1/6" y 2") de 0,20 m de espesor (ver Figura 72).



**Figura 72. Vista del lecho de secado**

Fuente: Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización – OPS (2005)

**4.7.10 Diseño de humedal de flujo subsuperficial**

**a. Temperatura del humedal**

Siendo la temperatura media del agua determinada durante los aforos, se determina la temperatura en el humedal que por lo general tiende a bajar 1 °C. (Huallpa et al., 2010).

$$Temp\ Humedal = Temp\ Agua - 1 \dots\dots\dots 4.62$$

**b. Diseño para la remoción de DBO**

Las ecuaciones para su diseño son las siguientes:

$$K_T = K_{20} (1.06)^{(T-20)} \dots\dots\dots 4.63$$

$$K_{20} = 0.678 * d^{-1} \dots\dots\dots 4.64$$

**Área superficial requerida para eliminar la DBO**

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * y * n} \dots\dots\dots 4.65$$

Donde:

Q= caudal de diseño en m<sup>3</sup>/día

Co= Concentración del componente en el afluente en mg/l

Ce= Concentración del componente en el efluente en mg/l - LMP

K<sub>T</sub>= Coeficiente de temperatura

y= profundidad de las balsas

n= coeficiente de porosidad

**Tiempo de retención hidráulica**

$$TRH = \frac{As * y * n}{Q} \dots\dots\dots 4.66$$

Teniendo en cuenta la última capa de grava y la capa de residuos que cubren el humedal se debe determinar el coeficiente de transferencia de calor de acuerdo a la Tabla 60.

**Tabla 60:**

**Conductividad térmica de los componentes de un HSS**

MATERIAL	K(W/m°C)
Capa de restos de vegetación	0.05
Grava seca (25% de humedad)	1.50
Grava saturada	2.00
Suelo seco	0.80
Hielo (a 0°C)	2.21

**Fuente:** Huallpa et al., (2010)

Por lo que el coeficiente de calor está dado por:

$$U = \frac{1}{\frac{Y_1}{K_1} + \frac{Y_2}{K_2} + \frac{Y_3}{K_3}} \dots\dots\dots 4.67$$

Donde:

Y<sub>1,2,3</sub> = Espesor de cada una de las capas que componen el HSS

K<sub>1,2,3</sub> = Conductividad térmica de cada capa

Considerando este coeficiente de calor, se calcula el cambio de temperatura en el humedal:

$$Tc = \frac{U(T\ agua - T\ aire) * TRH * 86400}{Cp * Q * y * n} \dots\dots\dots 4.68$$

Donde:

$T_{\text{agua}}$  = Temperatura del agua residual tomada durante los aforos

$T_{\text{aire}}$  = Temperatura del aire, obtenida del análisis hidrológico

$C_p$  = Capacidad de calor específico del AR (4215 J/Kg°C)

De aquí que la temperatura del efluente está dada por:

$$T_e = T_{\text{agua}} - T_c \quad \dots\dots\dots 4.69$$

La temperatura promedio en el humedal será de:

$$T_w = \frac{T_{\text{agua}} - T_e}{2} \quad \dots\dots\dots 4.70$$

La temperatura promedio en el humedal debe ser menor o igual a la temperatura del afluente.

$$T_w \leq T_{\text{afluente}}$$

Ancho mínimo del humedal:

$$W = \frac{1}{y} \sqrt{\left( \frac{Q^* A_s}{m^* K_s} \right)} \quad \dots\dots\dots 4.71$$

Donde:

$Q$  : caudal (m<sup>3</sup>/d)

$A_s$  : área superficial de la celda del humedal (m<sup>2</sup>)

$y$  : profundidad del agua en el humedal (m)

$m$  : pendiente del fondo del lecho (% expresado como decimal). Este valor está típicamente entre 5 y 20% de la pérdida de carga potencial.

$K_s$  : Conductividad hidráulica ( $m^3/m^2/d$ ) La presenta órdenes de magnitud estimados para un rango de materiales granulares que podrían ser usados en un humedal HFS.

Teniendo el  $W$  mínimo de la celda procedemos a calcular el largo  $L$  de la celda y verificar si cumple la relación largo:ancho sugerida de 1:1 a 4:1. En caso que esta relación sea menor se divide el humedal en el número de celdas necesarias para que la relación largo: ancho este entre el rango sugerido. En caso de que la relación sea mayor, se coloca el límite superior fijo y se procede a calcular las dimensiones de la o las celdas.

### c. Remoción de sólidos suspendidos

Para determinar la remoción de sólidos en el humedal, se debe considerar la velocidad del flujo en el humedal de la cual se efectuará la sedimentación.

Velocidad del flujo, en base a la ecuación:

$$CH = \frac{Q}{As} * 100 \text{ cm / dia} \quad \dots\dots\dots 4.72$$

Concentración de sólidos en el efluente:

$$C_e = SS[0.1058 + (0.0014(CH))] \text{ mg / l} \quad \dots\dots\dots 4.73$$

Donde:

SS= Sólidos suspendidos en el afluente

#### d. Remoción de nitrógeno

Para una eficiente remoción del nitrógeno en un humedal se debe considerar la temperatura del agua dentro del humedal, para llevar a cabo los procesos de desnitrificación.

Se calcula la constante de temperatura en el humedal en base a la ecuación 4.64:

$$K_T = 0.2187(1.048^{T-20})$$

Donde:

$K_T$  = Coeficiente de temperatura a 25 °C

T = Temperatura de diseño

Superficie necesaria para la remoción de Nitrógeno en base a la ecuación 4.65:

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * y * n}$$

Tiempo de retención hidráulica en base a la ecuación 4.66:

$$TRH = \frac{A_s * y * n}{Q}$$

Hasta el momento se ha considera que en el humedal solamente radica el vertido, ignorando tanto la grava como la vegetación presente, considerando estos factores, el diseño se da como sigue:

Primeramente se determina la concentración de nitrógeno como nitrato en el efluente, dado que el nitrato permanece en el agua para ser absorbido por medio de la vegetación, en este diseño el vegetal lo absorbe por vía radicular y lo utiliza para formar sus proteínas. La desnitrificación del nitrato a nitrógeno gaseoso, se produce en condiciones anaerobias por microorganismos que utilizan el nitrato como aceptor de electrones y el carbono orgánico como donante electrónico; es decir, son condiciones indispensables la ausencia de oxígeno y la disponibilidad de carbono orgánico (Huallpa et al., 2010).

La concentración de nitratos en el efluente, se determina en base a la ecuación:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_T t} \dots\dots\dots 4.74$$

Para determinar la superficie requerida para la remoción de nitrato se deben realizar dos cálculos, considerando el 50 % y 100 % de obstrucción del humedal a causa de las raíces.

- **50 % de obstrucción:**

*Constante de obstrucción al 50%.*

$$K_{50} = \left\{ 0.01854 + \left[ 0.3922 \left( \frac{\%Obs}{100} \right)^{2.6077} \right] \right\} \dots\dots\dots 4.75$$

*Donde:*

*%obs = porcentaje de obstrucción*

Superficie del humedal, en base a la ecuación 4.64:

$$As_{50} = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * y * n}$$

Tiempo de retención hidráulica, en base a la ecuación 4.65:

$$TRH = \frac{As_{50} * y * n}{Q}$$

Concentración de nitratos en el efluente, en base a la ecuación 4.74:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_T t}$$

- **100 % de obstrucción:**

*Constante de obstrucción al 100%, en base a la ecuación 4.75:*

$$K_{100} = \left\{ 0.01854 + \left[ 0.3922 \left( \frac{\%Obs}{100} \right)^{2.6077} \right] \right\}$$

Donde:

$\%obs$  = porcentaje de obstrucción

Superficie del humedal, en base a la ecuación 4.65:

$$As_{100} = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * y * n}$$

Tiempo de retención hidráulica, en base a la ecuación 4.66:

$$TRH = \frac{As_{100} * y * n}{Q}$$

Concentración de nitratos en el efluente, en base a la ecuación 4.74:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_T t}$$

Siendo:

t: tiempo de retención hidráulica

#### e. Remoción de fósforo

El fósforo se acumula en los sedimentos, cuando no es constituyente de los organismos. Así pues el principal mecanismo de remoción de fósforo de las aguas residuales necesariamente está basado en la acumulación en sedimentos y biomasa; la vegetación contribuye a la remoción del fósforo, siempre y cuando la biomasa se retire del sistema.

La remoción del fósforo en los humedales artificiales requiere de un proceso que exige grandes superficies.

Basándose en el análisis de los datos de la North American Data Base, Kadlec ha propuesto una constante de primer orden igual a 10m/año para estimar la remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales. Los 10 m/año equivalen a 2.74 cm/día. (Huallpa et al., 2010).

Esta constante se usa en la siguiente ecuación para calcular la Carga Hidráulica promedio anual:

$$CH = Ca_p \left[ e^{\left( \frac{-2.74}{Ce_p} \right)} \right] \dots\dots\dots 4.76$$

Donde:

CH = Carga hidráulica, cm/día

Ca<sub>p</sub>= concentración de fosforo total en el afluente, mg/l

Ce<sub>p</sub>= concentración de fosforo total en el efluente, mg/l

**Superficie requerida para la remoción de fosforo:**

$$As = \frac{(b)(Q)(\ln C_o - \ln C_e)}{K_p} \dots\dots\dots 4.77$$

Donde:

As= Área superficial del humedal, m<sup>2</sup>

B= factor de conversión. 100cm/m

Q= caudal promedio del humedal, m<sup>3</sup>/día

K<sub>p</sub>= 2,74cm/dia

Co= concentración de fosforo en el afluente, mg/l

Ce= concentración de fosforo en el efluente, mg/l

Periodo de retención hidráulica, en base a la ecuación 4.66:

$$TRH = \frac{As * y * n}{Q}$$

#### 4.7.11 Evaluación de remoción de Coliformes Fecales en humedales artificiales

Capacidad de remoción de coliformes fecales del Tanque Imhoff es de 60% según CEPIS.

$$C_e = C_o * (1 - E_f) \dots\dots\dots 4.78$$

Donde:

C<sub>e</sub>: coliformes a la salida del tanque Imhoff (NMP/100 ml)

C<sub>o</sub>: coliformes a la entrada del tanque Imhoff (NMP/100 ml)

E<sub>f</sub>: Eficiencia de remoción de BCF en Tanque Imhoff (%)

Para humedales artificiales, según Martín Gauss y Vidal Cáceres, OPS (Organización Panamericana de la Salud, 2005), la remoción de coliformes fecales es del orden de 2.5 - 3 unidades logarítmicas, lo que significa que la remoción de coliformes fecales es en orden de 99.90% (ver Tabla 61).

**Tabla 61:**

**Eficiencia de sistema de humedales en la remoción de contaminantes**

	Sistema Completo	Humedal Subsuperficial de flujo horizontal
<i>DQO</i>	90-95%	80-90%
<i>DBO5</i>	95-98%	90-95%
<i>SS</i>	>=90%	80-90%
<i>Nt*</i>	35%	35%
<i>Pt</i>	10-20%	10-20%
<i>Coliformes fecales</i>	2.5-3 un.log.	2-2.5un.log.

**Fuente:** Lapa (2014).

#### 4.7.12 Consideraciones en el diseño de los humedales

##### a. Criterios para la selección del material del lecho filtrante

La característica fundamental requerida para el material del lecho filtrante es su resistencia al desgaste provocado por las aguas residuales, la cual debe garantizar que el lecho no se deteriore con el transcurso del tiempo. La porosidad juega un papel

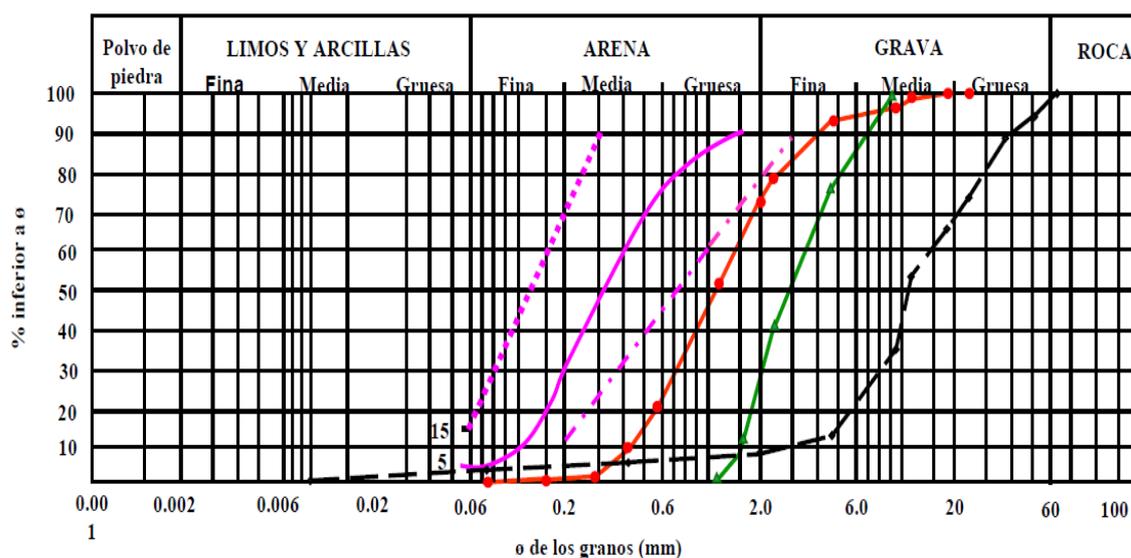
importante, puesto que de ella depende la superficie disponible para la formación de la capa bacteriana responsable en gran medida de la depuración de las aguas residuales y también tiene un efecto directo sobre el tamaño del Humedal, pues el uso de un material más poroso reduce el área a utilizar.

La granulometría del material tiene una influencia directa sobre la eficiencia del tratamiento y la capacidad hidráulica del humedal. A mayor diámetro de partícula, la capacidad hidráulica del humedal aumenta, pero disminuye la eficiencia de remoción de contaminantes debido a que hay una menor disponibilidad de área para el crecimiento bacteriano, además de que se ven afectados los demás mecanismos de remoción, tales como filtración, sedimentación, intercambio iónico y adsorción, entre otros. Por tal razón, la elección del diámetro de partícula debe realizarse con el objetivo de lograr un equilibrio entre la capacidad hidráulica y la eficiencia de remoción del humedal.

De acuerdo a Villarroel (2012) la conductividad hidráulica del material de lecho debe estar comprendida entre valores de  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  m/s y el 40 - 50% y un diámetro de partícula inferior a 1 cm. Con el transcurso del tiempo, la conductividad hidráulica de los primeros dos metros del lecho filtrante de un humedal se reduce debido a la formación de una densa capa bacteriana, a tal grado que es necesario reemplazar periódicamente este material por material nuevo. Sin embargo, el resto del lecho filtrante no experimenta este fenómeno, manteniendo su porosidad y por ende, su conductividad, semejante a la del material original.

#### **b. Granulometría**

El tamaño recomendado en la literatura para los diferentes materiales del lecho filtrante oscila entre 0 y 12 mm. En la Figura 73, se muestra la granulometría recomendada en la literatura y la de diferentes materiales utilizados para la construcción de humedales (Villarroel, 2012).



**Figura 73: Curvas granulométricas de materiales usados para la conformación del lecho filtrante**

**Nota:**

SIMBOLO	DESCRIPCIÓN
-----	Granulometría máxima recomendada para Humedal de flujo vertical, (BFV)
-----	Curva granulométrica típica de material usado para lecho filtrante de BFH
-----	Granulometría máxima recomendada para Humedales de flujo horizontal, (BFH)
—●—	Curva granulométrica del hormigón rojo
—▲—	Curva granulométrica de la piedra triturada
-----	Curva granulométrica del hormigón negro

**Fuente:** Villarroel (2012).

En las zonas de distribución y recolección del Humedal se usa piedra volcánica negra cuyo diámetro es de 2” a 4”, porque este tipo de material facilita la distribución y evita que los orificios de los tubos de recolección se obstruyan con material de granulometría fina. Se recomienda el uso de este material al menos en los primeros 5 m del humedal para alargar el período al cual se deben cambiar los dos primeros metros del lecho filtrante una vez cada dos años, debido a la obstrucción que se da por la formación de una densa capa bacteriana.

### **c. Instalación de las tuberías de drenaje de los lechos**

Se instalarán tubos de drenaje de PVC de 4" a 6" de diámetro y el largo dependerá de las dimensiones obtenidas en el diseño, con una tee al centro de la longitud para conectarlos con el tubo de salida del agua ya tratada a la caja de recolección. En estos tubos se perforarán tres filas de agujeros de ½", separados a 5 cm. Los tubos se colocarán en el extremo opuesto al canal de alimentación, en el fondo de las pilas, sobre una capa de piedra triturada de 5 cm de espesor por 40 cm de ancho, con los agujeros hacia arriba y con una pendiente hacia el centro de 0.2 %. Luego serán cubiertos con piedra volcánica de 2" - 4" de diámetro, similar al de la entrada al humedal. La capa de piedras de 2" y 4" de diámetro proporciona espacios libres que facilitan la introducción del agua en los tubos de recolección, formando al mismo tiempo una barrera que evita que el material del lecho filtrante de granulometría más fina, entre en contacto directo con los tubos de recolección y pueda causar problemas de obstrucción de los agujeros.

### **d. Caja de recolección del efluente**

La caja de recolección de las aguas residuales ya tratadas de la pila del Humedal, se construirán separada 1.0 m del borde de la pila y serán de mampostería piedra cantera, en bloques, reforzadas con columnas de concreto y acero 3/8". El objetivo de esta caja será el de regular el nivel del agua de la pila, por medio de un PVC 4" - 6" de diámetro que estará instalada dentro de la caja. De esta manguera se tomarán las muestras y se podrá medir el caudal de salida del sistema de tratamiento por el método de aforo. La tubería de salidas estará conectada con codos a los tubos de salida de cada pila del Humedal artificial en un extremo y por el otro, regulando así el nivel de agua dentro del Humedal. Las dimensiones recomendadas para una caja de recolección serán las siguientes: Largo 2.0 m, Ancho 1.0 m, Profundidad variable en dependencia del

terreno (m), Material a usar Piedra cantera, Piso de concreto 0.15 m de espesor, tubería PVC 4" - 6", Cubierta Tapa de madera, metal o C°A°.

#### **4.8 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA PROPUESTA DE PLANTEAMIENTO**

Para que un sistema natural de depuración de aguas residuales funcione correctamente y que cumpla con el periodo para el cual fue diseñado, es fundamental que el personal encargado de la operación y mantenimiento esté capacitado para que sepa cómo hacerlo, con qué frecuencia, qué insumos y herramientas necesita, que identifique los procesos que hagan posible el funcionamiento óptimo, eficiente y efectivo de la estación depuradora, sin que se produzcan interrupciones debidas a fallas de cualquiera de los elementos, procesos u operaciones ocasionadas por una deficiente operación y mantenimiento de cada uno de los elementos de la depuradora.

##### **4.8.1 Unidades de pre-tratamiento**

###### **a. Compuertas**

Se encuentran en las entradas a los desarenadores, ya que son necesarias para aislar el caudal y dar mantenimiento.

Un operador debe revisar diariamente que no se produzcan fugas o infiltraciones en las paredes de las compuertas. En caso de haber falla por este motivo el operador debe comunicar al responsable de la planta, para que se tomen las medidas correctoras.

###### **b. Cámara de rejas**

El procedimiento más usual consiste en hacer pasar el agua a través de rejas metálicas paralelas e igualmente espaciadas. Su función consiste en la eliminación de los sólidos de tamaño grande y mediano (trozos de madera, trapos, raíces, etc.) que estén en suspensión o flotando, así como de finos. A medida que los sólidos se van

acumulando en las rejillas, éstas se van colmatando y el agua encuentra mayor dificultad para atravesarlas. Por tanto, es necesario eliminar los sólidos depositados por lo menos una vez al día.

La limpieza de las rejillas se las hará de forma manual, debiendo efectuarla el operador, utilizando para ello un rastrillo que encaja entre los barrotes.

Es necesario que el operador recoja los sólidos de la limpieza lo antes posible y los entierre o los lleve diariamente al relleno sanitario municipal, en caso de haberlo, evitando siempre su almacenamiento a la intemperie, para evitar problemas de contaminación.

### **c. Desarenadores**

Los desarenadores eliminan arenas, partículas minerales u otras materias inorgánicas más pesadas que el agua, que tienden a sedimentarse. El desarenador propuesto es de flujo horizontal, formado por dos canales rectangulares a fin de optimizar el funcionamiento de la planta no dejándola fuera de servicio. La limpieza manual se lleva a cabo semanalmente mediante palas de mano y baldes, eliminando el material sedimentado que inclusive puede contener materia orgánica cuando se producen fluctuaciones de caudal.

Con respecto a la disposición de las arenas si su contenido de materia orgánica está produciendo malos olores ésta debe unirse a los sólidos procedentes de las otras unidades del pre-tratamiento y enterrarse o llevarse al relleno sanitario municipal, mientras que si la arena es más limpia, puede ser aprovechada en rellenos, caminos, lechos de secado de lodos y otros.

A continuación se encuentra un cuadro (Tabla 62) que resume cada una de las actividades a realizar durante la operación y mantenimiento de cada una de las unidades del tratamiento preliminar.

**Tabla 62:**

**Resumen de las actividades de operación y mantenimiento de las unidades de pre-tratamiento**

UNIDAD	ACTIVIDAD	FRECUENCIA	PERSONAL	HERRAMIENTAS
Desbaste	Inspección, limpieza de sólidos de tamaño grande y mediano (trozos de madera, trapos, raíces, etc.) así como de finos.	1 vez / día	Operador	Rastrillo, pala de mano, carretilla
Desarenador	Inspección y retiro de arenas y otros materiales pesados que se acumulan en el fondo del desarenador.	1 vez / semana	Operador	Pala de mano, balde, carretilla

**Fuente:** Elaboración Propia

#### 4.8.2 Tratamiento primario

##### A. Tanque Imhoff

###### - *Arranque*

Antes de poner en funcionamiento el tanque Imhoff, deberá ser llenado con agua limpia y si fuera posible, el tanque de digestión inoculado con lodo proveniente de otra instalación similar para acelerar el desarrollo de los microorganismos anaeróbicos encargados de la mineralización de la materia

orgánica. Es aconsejable que la puesta en funcionamiento se realice en los meses de mayor temperatura para facilitar el desarrollo de los microorganismos en general.

#### - *Operación*

##### **Zona de sedimentación**

En el caso que el tanque Imhoff disponga de más de un sedimentador, el caudal de ingreso debe dividirse en partes iguales a cada una de ellas. El ajuste en el reparto de los caudales se realiza por medio de la nivelación del fondo del canal, de los vertederos de distribución o mediante el ajuste de la posición de las pantallas del repartidor de caudal.

La determinación del período de retención de cada uno de los tanques de sedimentación se efectúa midiendo el tiempo que demora en desplazarse, desde el ingreso hasta la salida, un objeto flotante o una mancha de un determinado colorante como la fluoresceína.

Durante la operación del tanque Imhoff, la mayor proporción de los sólidos sedimentables del agua residual cruda se asientan a la altura de la estructura de ingreso, produciendo el mal funcionamiento de la planta de tratamiento. En el caso de tanques Imhoff compuesto por dos compartimientos, la homogenización de la altura de lodos se realiza por medio de la inversión en el sentido del flujo de entrada, la misma que debe realizarse cada semana mediante la manipulación de los dispositivos de cambio de dirección del flujo afluente.

##### **Zona de ventilación**

Cuando la digestión de los lodos se realiza en forma normal, es muy pequeña la atención que se presta a la ventilación. Si la nata permanece húmeda, ella continuará digiriéndose en la zona de ventilación y progresivamente irá sedimentándose dentro del compartimiento de digestión.

Se permite la presencia de pequeñas cantidades de material flotante en las zonas de ventilación. Un exceso de material flotante en estas zonas de ventilación puede producir olores ofensivos y a la vez cubrir su superficie con una pequeña capa de espuma lo que impide el escape de los gases.

Para mantener estas condiciones bajo control, la capa de espuma debe ser rota o quebrada periódicamente y antes de que seque. La rotura de la capa se puede ejecutar con chorros de agua proveniente de la zona de sedimentación o manualmente quebrando y sumergiendo la capa con ayuda de trinchas, palas o cualquier otro medio.

Esta nata o espuma puede ser descargada a los lechos de secado o en su defecto enterrado o ser dispuesto al relleno sanitario. Los residuos conformados por grasas y aceites deberán ser incinerados o dispuestos por enterramiento o en el relleno sanitario.

### **Zona de digestión de lodos**

La puesta en marcha del tanque Imhoff o después que ha sido limpiado, debe ejecutarse en la primavera o cercana a la época de verano. Muchos meses de operación a una temperatura cálidas es requerida para el desarrollo de las condiciones óptimas de digestión.

Es deseable mantener el lodo el mayor tiempo posible en zona de digestión a fin de lograr una buena mineralización. Al efecto el nivel de lodo debe ser mantenido entre 0,5 y un metro por debajo de la ranura del sedimentador y en especial de su deflector.

Es aconsejable que durante los meses de verano se drene la mayor cantidad posible de lodos para proveer capacidad de almacenamiento y mineralización de los lodos en época de invierno.

Por ningún motivo debe drenarse la totalidad de lodos, siendo razonable descargar no más de 15% de volumen total o la cantidad que puede ser aceptado por un lecho de secado.

El drenaje de lodo debe ejecutarse lentamente para prevenir alteración en la capa de lodo fresco.

#### - *Limpieza*

##### **Zona de sedimentación**

Toda la superficie de agua del sedimentador debe estar libre de la presencia de sólidos flotantes, espumas, grasas y materiales asociados a las aguas residuales, así como de material adherido a las paredes de concreto y superficies metálicas con el cual los sólidos están en contacto.

El material flotante tiende a acumularse rápidamente sobre la superficie del reactor y debe ser removido con el propósito de no afectar la calidad de los efluentes, por lo que ésta actividad debe recibir una atención diaria retirando todo el material existente en la superficie de agua del sedimentador.

La recolección del material flotante se efectúa con un desnatador. La versión común de esta herramienta consiste de una paleta cuadrada de 0,45 x 0,45 m construida con malla de ¼” de abertura y acoplada a un listón de madera.

Las estructuras de ingreso y salida deberán limpiarse periódicamente, así mismo los canales de alimentación de agua residual deben limpiarse una vez concluida la maniobra de cambio de alimentación con el propósito de impedir la proliferación de insectos o la emanación de malos olores. Semanalmente o cuando las circunstancias así lo requieran, los sólidos depositados en las paredes del sedimentador deben ser retirados mediante el empleo de raspadores con base de

jebe y la limpieza de las paredes inclinadas del sedimentador debe efectuarse con un limpiador de cadena.

La grasa y sólidos acumulados en las paredes a la altura de la línea de agua deben ser removidos con un raspador metálico.

### **Zona de ventilación**

La zona de ventilación de la cámara de digestión, debe encontrarse libre de natas o de sólidos flotantes, que hayan sido acarreados a la superficie por burbujas de gas.

Para hundirlas de nuevo, es conveniente el riego con agua a presión, si no se logra esto, es mejor retirarlas, y enterrarlas inmediatamente. La experiencia indica la frecuencia de limpieza, pero cuando menos, debe realizarse mensualmente.

Generalmente se ayuda a corregir la presencia de espuma, usando cal hidratada, la cual se agrega por las áreas de ventilación. Conviene agregar una suspensión de cal a razón aproximada de 5 Kg. por cada 1000 habitantes.

### **Zona de digestión de lodos**

Es importante determinar constantemente el nivel de lodos para programar su drenaje en el momento oportuno. Cuando menos una vez al mes, debe determinarse el nivel al que llegan los lodos en su compartimiento.

Para conocer el nivel de lodos se usa una sonda, la que hace descender cuidadosamente a través de la zona de ventilación de gases, hasta que se aprecie que la lámina de la sonda toca sobre la capa de los lodos; este sondeo debe verificarse cada mes, según la velocidad de acumulación que se observe.

Los lodos digeridos se extraen de la cámara de digestión abriendo lentamente la válvula de la línea de lodos y dejándolos escurrir hacia los lechos de secado. Los lodos deben extraerse lentamente, para evitar que se apilen en los

lechos de secado, procurando que se destruyan uniformemente en la superficie de tales lechos.

La fuga de material flotante en la salida del sedimentador será un indicio de la necesidad de una extracción más frecuente de lodo del digestor.

Se recomienda que en cada descarga de lodos, se tome la temperatura del material que se está escurriendo, lo mismo que la temperatura ambiente. Con esto se tiene una indicación muy valiosa de las condiciones en que se está realizando la digestión.

## **B. lechos de secado**

### **- *Preparación del lecho de secado***

Los lechos de secado deben ser adecuadamente acondicionados cada vez que vaya a descargarse lodo del digestor. La preparación debe incluir los siguientes trabajos:

- Remover todo el lodo antiguo tan pronto como se haya alcanzado el nivel de deshidratación que permita su manejo. El lodo deshidratado con un contenido de humedad no más del 70% es quebradizo, de apariencia esponjosa y fácilmente hincable con tridente.
- Nunca añadir lodo a un lecho que contenga lodo.
- Remover todas las malas hierbas u otros restos vegetales.
- Escarificar la superficie de arena con rastrillos o cualquier otro dispositivo antes de la adición de lodo. Esto reduce la compactación de la capa superficial de arena mejorando la capacidad de filtración.

### **- *Reemplazo de la capa de arena***

Periódicamente debe ser reemplazado la capa de arena hasta alcanzar su espesor original. Una parte de la capa de arena se pierde cada vez que se remueve el

lodo seco. La arena que se utilice para reponer el espesor original debe ser de la misma característica que la especificada en su construcción.

- ***Calidad del lodo digerido***

El lodo a ser descargado a los lechos de secado debe estar adecuadamente digerido.

Lodos pobremente digeridos son ofensivos a los sentidos especialmente al olfato y el proceso de secado es sumamente lento. Así mismo, el lodo que ha permanecido en el digester mayor tiempo del necesario también tiene un proceso de secado muy lento. Es decir, que los dos extremos, la pobre digestión o un tiempo de digestión mayor al necesario son perjudiciales.

Los aceites, grasas y otros residuos oleosos obturarán los poros de la arena y no deben ser descargados a los lechos de secado.

Muestras de lodos deberán ser examinados antes de proceder a su descarga para determinar si las características son las más adecuadas. Entre ellas se tiene:

- Características físicas: El lodo debe ser examinado para determinar su color, textura y olor. Estos son excelentes indicadores del estado de digestión de los lodos.
- Volumen a remover: El volumen removido debe ser calculado y registrado para determinar la capacidad de digestión y evaluar la cantidad de sólidos fijos y volátiles removidos del sistema. El volumen removido puede ser calculado rápidamente a través de la determinación del volumen ocupado por el lodo en el lecho de secado.
- Sólidos totales. La concentración de sólidos como medida del contenido de sólidos totales, indica la capacidad de retención de agua por parte del lodo y el grado de compactación.

- Porcentaje de materia volátil. Esta prueba indica el grado el nivel de degradación de la materia orgánica
- Valor de pH.- El valor de pH del lodo digerido debe ser próximo a 7.0, mientras que lodos con valores de pH menor a 7.0 indica que requiere mayor tiempo de digestión y que no está listo para ser secado.

- ***Descarga del lodo digerido***

El lodo debe ser descargado del digestor a una tasa bastante alta a fin de mantener limpia la tubería de descarga hacia el lecho de secado. La presencia de material compactado, incluida la arena en el tubo de descarga puede requerir el sondeo o la necesidad de efectuar un retrolavado. Al inicio del proceso de drenaje de lodos, la válvula debe ser abierta totalmente y una vez que el flujo se estabilice, la válvula debe ser cerrada hasta obtener un flujo regular. El drenaje de lodo debe prolongarse hasta haber purgado la cantidad prevista de lodo.

Luego de la descarga de lodo al lecho de secado, debe drenarse la tubería y luego lavarse con agua. Esto no sólo previene la obturación de la tubería, sino que también evita la generación de malos olores o gases por la descomposición del lodo acumulado en la tubería de descarga.

Se debe tener mucho cuidado con los gases porque cuando se mezclan con el aire forman una mezcla altamente explosiva. La presencia de fuego directo o de operadores con cigarrillos debe ser prohibido cuando se drene los lodos hacia los lechos de secado.

- ***Profundidad del lodo***

El espesor de la capa lodo a ser depositado sobre el lecho de secado no debe ser mayor a 0,30 m e idealmente de 0,25 m. Con buenas condiciones ambientales y un buen lecho de secado, un lodo bien digerido, deberá deshidratarse

satisfactoriamente y estar listo para ser removido del lecho de secado entre una a dos semanas. Lodos con alto contenido de sólidos puede requerir hasta tres semanas o más a menos que se descargue capas de lodo menos profundas.

Normalmente, el volumen de lodos se reduce un 60% o más por medio de este método de deshidratación.

- ***Remoción del lodo de los lechos de secado***

El mejor momento para retirar los lodos de los lechos de secado depende de:

- La adecuada resquebrajadura del lodo.
- La necesidad de drenar un nuevo lote de lodos del digestor.
- Contenido de humedad de los lodos en el lecho de secado.

El lodo seco puede ser retirado por medio de pala o tridente cuando el contenido de humedad se encuentra entre el 70 y 60%. Pero si se deja secar hasta el 40% de humedad, el peso será la mitad o la tercera parte y se podrá ser manejado más fácilmente.

**a. Herramientas requeridas**

Una de las mejores herramientas es la pala plana y el tridente. Con el tridente, el lodo seco puede ser removido con mucha menor pérdida de arena que con la pala. En todo caso, siempre será necesario reponer la arena perdida que se adhiere en el fondo de la capa de lodo seco.

Un equipo de gran ayuda es la carretilla para retirar el lodo al punto de disposición final, para lo cual se deben colocar tablas para facilitar el desplazamiento de la carretilla.

**b. Disposición**

El lodo removido de los lechos de secado puede ser dispuesto en el relleno sanitario o almacenado por un tiempo para lograr una mayor

deshidratación y de esta manera un menor volumen y peso que facilite el transporte hacia el lugar de disposición final.

#### **4.8.3 Tratamiento Secundario**

##### **b. Humedal artificial de flujo subsuperficial (HSS)**

El agua que llegue hasta el humedal debe garantizar la máxima remoción de sólidos y grasas en los tratamientos preliminares, para esto es necesario una adecuada operación y mantenimiento de las estructuras.

Se dan las siguientes indicaciones:

- Controlar regularmente el color y olor del efluente del humedal que da información importante acerca de la calidad y el funcionamiento del lecho.
- La detección de turbiedad y/o color grisáceo, indica un insuficiente suministro de oxígeno. La reacción debe ser: El drenaje del efluente debe reducirse con la finalidad de permitir una mayor entrada de oxígeno.
- El mal olor del agua tratadas (como “huevos en descomposición”) indica procesos anaeróbicos y por lo tanto una situación muy crítica. El lecho debe estar en reposo y la recarga debe disminuir o el suministro de oxígeno en el humedal debe ser mejorado (como fue indicado en el punto anterior).
- Efluentes claros pero con color, ligeramente amarillo o marrón, es una situación normal en los tratamientos biológicos, especialmente en humedales (por los ácidos húmicos).
- Inspeccionar en la vegetación de los humedales que no haya “enfermedades”, insectos, etc.
- Se debe prestar atención a las malezas o plantas depredadoras hasta que la vegetación del humedal esté plenamente establecida.

Los humedales sub superficiales, requieren un mínimo de mantenimiento empezando por la recolección periódica de los restos vegetales como varas y hojas muertas, operación que debe practicarse cada quince días en el verano, cada semana en el otoño y una vez al mes en el invierno. De no hacerse lo anterior los sólidos en pudrición podrían contribuir al azolvamiento del mismo. Con lo que respecta a la densidad de las plantas esta será según la especie; para el caso de carrizos (*Phragmites spp.*), se deberán mantener de 8 a 10 plantas/m<sup>2</sup>, para las espadañas o tule (*Typha spp.*), de 10 a 12 plantas, y para los juncos de 8 a 10 plantas/m<sup>2</sup>. La sobrepoblación de plantas puede llevar a que las raíces aprieten el medio y tapen los poros de las piedras.

En la Tabla 63, se muestra las actividades de operación y mantenimiento que deben ser realizadas en los sistemas de tratamiento por humedal artificial de flujo subsuperficial HSS, comprendiendo las frecuencias, personal y herramientas que son necesarias para la realización de una actividad determinada.

**Tabla 63:****Actividades de operación y mantenimiento del sistema por HSS**

UNIDAD/ PROBLEMA	ACTIVIDAD/ SOLUCION	FRECUEN CIA	PERSON AL	HERRAMIEN TAS
Humedal / Inundación del Lecho	Asegurar que los lechos están saturados pero no inundados.	1/día	Operador	Inspección visual
Humedal / Presencia de sólidos	El lecho debe ser inspeccionado para asegurar que no exista presencia de sólidos.	1/día	Operador	Inspección visual, tolva para sacar natas de grasas.

... continuación

UNIDAD/ PROBLEMA	ACTIVIDAD/ SOLUCION	FRECUEN CIA	PERSON AL	HERRAMIEN TAS
Humedal / Crecimient o inadecuado de plantas, malos olores.	Verificar el crecimiento saludable de las plantas, no permitir que las raíces se queden sin agua y vigilar el nivel de agua de modo que se mantenga 5 cm debajo de la superficie del medio granular.	1/semana	Operador	Inspección visual.
Humedal / Obstrucción de las unidades del sistema	Se comprobará que el agua fluya por todas las unidades del sistema. Limpieza en caso de ser necesario.	1/semana	Operador	Inspección visual, rastrillos, palas carretillas
Humedal	Los sistemas de vertido a las celdas deberán limpiarse.	1 a 6/meses	Operador	Rastrillos, palas, Carretillas
Humedal / vegetación que se descompone acelerando el proceso de colmatación	Siega manual para sacar las partes aéreas que se van secando de las plantas. Si la colmatación es severa se debe proceder a sustituir el medio granular.	1/año	Operador	Machetes, rastrillos.

**Fuente:** Elaboración propia

### c. Toma de muestras para la evaluación del efluente

Además de lo anteriormente señalado deberá tomarse muestras de agua residual a la salida del tratamiento, para realizar pruebas de DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno), pH, Temperatura, Sólidos en Suspensión, Coliformes Fecales, DQO (Demanda Química de Oxígeno). Esta actividad deberá realizarse siguiendo el

procedimiento descrito en el capítulo II apartado 2.3.16, como también se debe ceñir las recomendaciones de la RM-273-2013-MVCS y OMA. Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales, para evaluar el funcionamiento del sistema de tratamiento propuesto.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Se realizó la evaluación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales existente en la localidad del distrito de Taraco, verificándose la situación actual de los sistemas en base a los parámetros físicos, químicos y biológicos. Pudiéndose determinar que el sistema de tratamiento N° 01 y sistema de tratamiento N° 02, no están trabajando eficientemente ya que su eficiencia de remoción es baja. Por lo que, en los aspectos de calidad de vertimiento al río no cumplen con los límites máximos permisibles, consecuentemente se debe replantear los sistemas de tratamiento en cuanto a su diseño y ubicación.

Mediante la caracterización de aguas residuales se pudo determinar la eficiencia de tratamiento de cada uno de los sistemas de tratamiento:

- Sistema de tratamiento N° 01: eficiencia de  $DBO_5$  es de 26.82% teniendo 203.60mg/L en afluente y 149.00 mg/L en el efluente, lo cual significa de falta reducir por lo menos hasta 100 mg/L según reglamento. En el caso del DQO su eficiencia es de 25.27% teniendo 389.75 mg/L en afluente y 291.25 mg/L en el efluente, lo cual significa de falta reducir por lo menos hasta 200 mg/L según reglamento, eficiencia de remoción de sólidos totales en suspensión 22.74%, siendo en el afluente 331.75 mg/L y 256.31 mg/L en el efluente, lo cual no cumple con el límite máximo permisible que es de 150 mg/L. También se determinó la eficiencia de remoción Coliformes Fecales 56.52%. Con respecto a los parámetros de pH, temperatura, aceites y grasas, se mantienen dentro de los rangos permisibles. Por otro lado cabe resaltar que en efluente del sistema de

tratamiento se encontraron fosforo total de 0.27 mg/L, Nitratos como  $\text{NO}_3^-$  de 19.62 mg/L, Nitrito como  $\text{NO}_2^-$  de 0.85 mg/L, Nitrógeno amoniacal  $\text{NH}_4$  33.56 mg/l, Coliformes totales  $> 11 \times 10^3$  NMP/100ml, *Vibrio cholerae* de 35.00 NMP/100ml, presencia de salmonella y huevo de helmintos 23.00 cant/L.

- Sistema de tratamiento N° 02: eficiencia de  $\text{DBO}_5$  es de 13.09% teniendo 142.87mg/L en afluente y 124.17 mg/L en el efluente, lo cual significa de falta reducir por lo menos hasta 100 mg/L según reglamento. En el caso del DQO su eficiencia es de 12.95% teniendo 273.30 mg/L en afluente y 237.90 mg/L en el efluente, lo cual significa de falta reducir por lo menos hasta 200 mg/L según reglamento, eficiencia de remoción de sólidos totales en suspensión 66.18%, siendo en el afluente 333.12 mg/L y 112.66 mg/L en el efluente, lo cual cumple con el límite máximo permisible que es de 150 mg/L. También se determinó la eficiencia de remoción Coliformes Fecales 46.67%. Con respecto a los parámetros de pH, temperatura, aceites y grasas, se mantienen dentro de los rangos permisibles en aspectos de vertimiento hacia el rio. Por otro lado cabe resaltar que en efluente del sistema de tratamiento se encontraron fosforo total de 0.17 mg/L, Nitratos como  $\text{NO}_3^-$  de 11.22 mg/L, Nitrito como  $\text{NO}_2^-$  de 0.28 mg/L, Nitrógeno amoniacal  $\text{NH}_4$  27.11 mg/l, Coliformes totales  $> 11 \times 10^3$  y huevo de helmintos 20.50 cant/L.

Al comparar los valores determinados en el efluente de cada uno de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, con los LMP (límites máximos permisibles) establecidos en el D.S. N° 003 – 2010 – MINAM, se concluye que el nivel de contaminación es alto ya que los contaminantes potenciales ( $\text{DBO}_5$ , DQO), superan los LMP, contaminando y afectando de este modo a la vida acuática existente.

En base a los estudios de ingeniería, se plantea una propuesta de tratamiento de aguas residuales que se basa en un tipo de tratamiento blando mediante humedales sub-superficiales de flujo horizontal precedidas de estructuras preliminares como 01 unidad cámara de rejas, 01 unidad desarenador, 01 unidad medidor Parshall, y de un tratamiento primario siendo tanque Imhoof. Mediante el tren de tratamiento se espera lograr una remoción 90.65% de  $DBO_5$ , obteniéndose en el efluente del sistema de tratamiento un valor de  $DBO_5$  de 16.19 mg/l, una remoción de Sólidos Suspendidos Totales de 78.52% teniéndose en el efluente un valor de 39.28 mg/l, una remoción de fósforo de 26.68% teniéndose en el efluente un valor de 0.16 mg/l y una remoción de coliformes fecales de 99.9%, esperando en el efluente un valor de 4.4 NMP/100ml. Obteniéndose parámetros que son permisibles para el vertimiento de aguas residuales al río establecidos en el D.S. N° 003 – 2010 – MINAM.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Es fundamental la diseño y construcción de un nuevo sistema de tratamiento de aguas residuales para la localidad del distrito de Taraco, un tipo de tratamiento natural adecuado a las condiciones y características de la zona, con el propósito de lograr una calidad de efluente adecuada que este dentro de los límites máximos permisibles de vertido de aguas residuales al cuerpo receptor.
- Se recomienda que se realice un análisis físico químico y microbiológico exhaustivo de las aguas del cuerpo receptor como de la captación de agua que abastece a la localidad del distrito de Taraco.
- Se recomienda al personal encargado de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua residual, llevar a cabo los registros de las características generales, parámetros operacionales como también los parámetros de monitoreo, con la finalidad de tener el comportamiento real en cuanto al funcionamiento a través de tiempo.
- Es necesario realizar gestiones por parte de la Municipalidad distrital de Taraco para poder implementar el nuevo sistema de sistemas con mayor eficiencia en el tratamiento de aguas residuales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguero, R. (1997). *Agua potable para poblaciones rurales*. Lima - Perú: Asociación Servicios Educativos Rurales (SER).
- Alianza por el Agua. *Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Centroamérica*.
- Andreo, P. (2014). *Evaluación y Diseño de un Humedal Construido para la Depuración de Aguas Residuales Domésticas*. Universidad de Murcia.
- Angelone, S., Teresa, M. y Cauhapé, M. (2006). *Geología y Geotecnia – Permeabilidad de suelos*. Universidad Nacional de Rosario.
- Arocha, S. (2015). *Abastecimiento de agua (vol. 2)*. Juliaca: Editorial Diego.
- Ayala, R., & Gonzales, G. (2008). *Apoyo didáctico en la enseñanza – aprendizaje de la asignatura de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba – Bolivia.
- Braja M. Das. (1999). *Fundamentos de la ingeniera geotécnica*. México Thomson editores, S.A.
- Callata, J. (2014). *Evaluación y propuesta de la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Ajoyani – Carabaya – Puno – 2013*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Perú.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en*. Bogotá - Colombia: McGraw-Hill.
- Cuervo, H. (1987). *Evaluación Hidráulica y Optimización de las Lagunas de Estabilización de la Compañía Nacional de Chocolates*. Rionegro, Antioquia.
- Decreto Supremo N° 003-2010 – MINAM. *Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales Domesticas y Municipales*. Lima–Perú.
- Decreto Supremo N° 004-2017 – MINAM. *Estándares Nacionales de Calidad*.

- Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba - Bolivia.
- D.S. N° 011-2006-VIVIENDA. *Reglamento Nacional de Edificaciones*.
- Dueñas, R. (2015). *Evaluación y propuestas de mejoramiento de la planta de tratamiento de aguas residuales en el centro poblado de Quiquijana, distrito de Quiquijana, provincia de Quispicanchis, región Cusco*. Universidad Católica de Santa María, Facultad de Arquitectura, Ingeniería Civil y del Ambiente, Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Arequipa - Perú.
- FONAM. (2010). *Oportunidades de Mejoras Ambientales por el Tratamiento de Aguas Residuales en el Perú*. Lima - Perú.
- Guevara, V. (1996). *Propuesta metodológica evaluación de lagunas de estabilización primera aproximación OPS/C.E.P.I.S*. Lima – Perú.
- Haro, M., & Aponte, N. (2010). *Evaluación de un humedal artificial como tratamiento de agua residual en un asentamiento irregular*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Huallpa, D., Solano , N., Ordoñez , Y., Gonzales, J., Aguilar, S., & Robles, S. (2010). *Guía para la selección de tecnologías de depuración de aguas residuales por métodos naturales*. Loja - Ecuador.
- Instituto Tecnológico de Canarias S.A. (ITC), 2006. *Guía sobre Tratamientos de Aguas Residuales Urbanas para Pequeños Núcleos de Población*. Primera ed. Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias.
- Jorge G. (2014). *Formulación Aspectos Técnicos de Saneamiento. I Curso de Formulación y Evaluación en PIP del Sector Saneamiento*. Moquegua.
- Lapa, R. (2014). *Propuesta de diseño de humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales con fines de riego en la ciudad universitaria – UNSCH- 2014*. Ayacucho – Perú. Ayacucho - Perú.

- Martinez, A. y Guzman, N. (2003). *Estudio y evaluación de las lagunas de estabilización como tratamiento de las aguas residuales domésticas en la Base militar No. 10 de Jutiapa, Colonia militar de Jutiapa, Base aérea del sur en Retalhuleu y Escuela politécnica en San Juan Sacatepéquez*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Metcalf y Eddy. (1998). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Ministerio del Ambiente (MINAM), 2010. *Manual para Municipios Ecoeficientes*. Lima: Ministerio del Ambiente.
- Ministerio de Transportes y comunicaciones (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Lima – Perú.
- Oakley, S. (2011). *Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas en Centroamerica*. USAI. CCAD.
- Organismo de evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), 2014. *Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales*. Lima: Fondo Nacional del Ambiente.
- Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2005). *Guía para el Diseño de Tanques Sépticos, Tanques Imhoff y Lagunas de estabilización*. Lima – Perú.
- Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2005). *Guía para la operación y mantenimiento de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización*. Lima – Perú.
- Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2005). *Especificaciones técnicas para la construcción de tanque séptico, tanque Imhoff y laguna de estabilización*. Lima – Perú.
- Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2005). *Guías para el diseño de tecnologías de alcantarillado*. Lima – Perú.

- Pidre, J. (2010). *Influencia del tipo y granulometría del sustrato en la depuración de las aguas residuales por el sistema de humedales artificiales de flujo vertical y horizontal*. Universidad de Cadiz.
- Quispe, J. (2013). *Propuesta metodológica para la evaluación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domesticas mediante lagunas de estabilización - Azángaro*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Perú.
- RM-273-2013-MVCS y OMA. *Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales*.
- RNE, D.S. N° 022 - 2009 – VIVIENDA, *Modifican Norma Técnica OS. 090 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales del Reglamento Nacional de Edificaciones*.
- RNE, D. N.-2.-V. (2009). *Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales del Reglamento Nacional*.
- Romero, J. (2001). *Tratamiento de aguas residuales*. Bogotá - Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Silva, J. (2004). *Evaluación y Rediseño del sistema de lagunas de*. Piura - Perú.
- Suarez, C. (2011). *Tratamiento de Aguas Residuales Municipales en el Valle del Cauca*. Universidad del Valle Santiago de Cali.
- Valdez, E., & Vázquez, A. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. México.
- Villarroel, J. (2012). *Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante humedales artificiales en la comunidad de Rumichaca*. Universidad Nacional Agraria la Molina - Facultad De Ingeniería Agrícola. Lima - Perú.

## ANEXOS

**ANEXO 01:** CERTIFICADOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

**ANEXO 02:** CERTIFICADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

**ANEXO 03:** CONSTANCIA DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

**ANEXO 04:** RESULTADOS – ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS

**ANEXO 05:** DATOS REPORTADOS - SENAMHI

**ANEXO 06:** RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE CAUDAL Y TEMPERATURA  
EN CAMPO

**ANEXO 07:** MATRIZ DE SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

**ANEXO 08:** HOJA DE CÁLCULO HIDRÁULICO DEL TREN DE TRATAMIENTO

**ANEXO 09:** PLANOS DE PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL TREN DE  
DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES –  
TARACO

**ANEXO 10:** DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM

**ANEXO 11:** DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM

**ANEXO 12:** DOCUMENTO R.D. NRO. 044-2017-2017-ANA-AAA.TIT

**ANEXO 13:** PANEL FOTOGRÁFICO