



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

OPTIMIZACIÓN DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN MEDIANTE EL USO DE MACROFITAS

Issa Moret Chiappe

Piura, enero de 2014

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

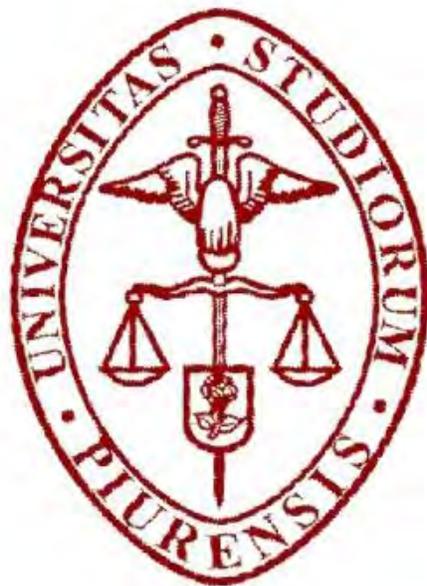
Moret, I. (2014). *Optimización de lagunas de estabilización mediante el uso de macrofitas*. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**OPTIMIZACIÓN DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN MEDIANTE EL USO DE
MACROFITAS**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Issa Moret Chiappe

Asesor: Dr. Ignacio Benavent Trullenque

Piura, Enero 2014

A mis papás, que sin ellos no hubiese llegado hasta donde estoy, esta tesis va por cuenta de ellos.

A mis hermanos, por querernos como nos queremos; sí, somos diferentes a los demás, así es mejor.

A Jose, por sufrir conmigo esta tesis y apoyarme en todo lo que me propongo.

PRÓLOGO

La situación de las aguas residuales en el Perú, y en muchos países del mundo, es preocupante, debido a que son emitidas a ríos, lagunas y otros cuerpos de agua sin previo tratamiento o, con tratamientos tan desfigurados que en el fondo son una forma de camuflar, en aras de lo políticamente correcto, una indiferencia imperdonable hacia la conservación del medioambiente.

A partir de la década de los 60, se instalaron las primeras lagunas de oxidación en la zona de San Juan de Miraflores, Lima, con un asesoramiento excelente del CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, dependiente de la oficina Panamericana de Salud). Poco a poco estos sistemas se fueron popularizando y actualmente superan los 150. Esta situación, que aunque pareciera reflejar una preocupación por subsanar las pasadas deficiencias evidentes ha supuesto, más que un tratamiento ineficiente, una real falta de tratamiento y las aguas residuales son emitidas nuevamente, como antaño, a los cuerpos de agua limpia, contaminándolos. La realidad ha demostrado lo contrario: errores en el diseño, abandono de lagunas construidas, ausencia de vigilancia y operación, sobrecargas importantes como consecuencia del crecimiento poblacional, etc.

Construir nuevos sistemas resultaría de hecho imposible, dada la situación económica de muchas municipalidades. La respuesta a esta situación, no puede ser otra que la recuperación de los sistemas existentes, y la formulación de los nuevos en condiciones de mayor sostenibilidad.

Una mirada a la propia naturaleza, que en sí contiene fuerzas insospechadas para auto-recuperarse, nos abre un panorama revelador de posibilidades. Es el caso de los humedales naturales, ligeras depresiones donde se acumula el agua, ya sea por transporte o debido a la presencia de la napa freática. Por la larga permanencia del agua en ellas se establecen condiciones favorables al crecimiento de plantas, generalmente macrofitas que constituyen un conjunto de gran dinamismo y en el caso de aguas en circulación conforman un sistema de agradable aspecto y de gran eficiencia depuradora. Estos sistemas han sido clásicos en la depuración de aguas contaminadas por lo que, se construyen también humedales artificiales que cumplen el mismo rol, a nivel internacional, aunque no en el Perú.

Esta cualidad de los humedales es la que sirve de fundamento a la presente tesis: “Optimización de lagunas de estabilización mediante el uso de macrofitas”.

Quiero agradecer especialmente al Dr. Ignacio Benavent Trullenque, por todo el apoyo que me brindó en estos meses; también a la Ing. Maritza Gauthier Velarde, por apoyarme en el tiempo que estuve en la universidad, muchas gracias.

RESUMEN

El objetivo de la presente tesis, es investigar en base a la literatura existente, un sistema que permita optimizar, de una forma sostenible, la eficiencia de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura, mediante el uso de macrofitas, abundantes en los humedales naturales, establecidas en una forma singular -flotación-. Esta investigación permitirá su inclusión en un futuro proyecto, ya previsto. En este último, se podrán complementar los necesarios aspectos constructivos, que hagan asequible su replicación, estimada tan necesaria, en la mayoría de los sistemas existentes en la región.

La presente tesis contiene diversos conceptos fundamentales acerca de los sistemas de tratamiento de agua, los problemas que existen en el Perú, las posibles soluciones y de entre ellas la solución ya citada en el párrafo precedente, el uso de macrofitas que constituyen un filtro biodepurador de enneas (*Typha dominguensis*), sostenible, de bajo costo y eficiente.

Las conclusiones que se obtienen, señalan también aspectos constructivos preliminares adaptándose a las propias características de las lagunas y a un presupuesto moderado.

INDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1.....	3
Aguas residuales domésticas (ARD).....	3
1.1. ANTECEDENTES.....	3
1.2. ORIGEN.....	3
1.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	4
En los acápite siguientes se explican las principales características de las ARD.....	6
1.3.1. Características físicas.....	6
1.3.1.1. Temperatura.....	6
1.3.1.2. Color.....	7
1.3.1.3. Olor.....	7
1.3.1.4. Sólidos.....	7
1.3.2. Características químicas.....	7
1.3.2.1. Materia orgánica.....	7
1.3.2.2. Materia inorgánica.....	8
1.3.2.3. pH.....	8
1.3.3. Características biológicas.....	8
1.3.3.1. Bacterias.....	8
1.3.3.2. Organismos coliformes.....	9
1.3.4. Componentes que generan eutrofización.....	10
1.3.4.1. Nitrógeno.....	11
1.3.4.2. Fósforo.....	11
1.4. AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ.....	11
1.5. LEGISLACIÓN PERUANA RELACIONADA A LAS ARD.....	16
1.5.1. Normas Peruanas Generales.....	16
1.5.2. Normas Ambientales y Sanitarias.....	20
CAPÍTULO 2.....	23
Tratamiento de Aguas Residuales.....	23
2.1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL MUNDO.....	24
2.1.1. Tratamiento de las aguas residuales en el Perú.....	24
2.1.2. Tratamiento de las aguas residuales en América.....	29
2.1.3. Tratamiento de las aguas residuales en la Unión Europea.....	33
2.1.4. Tratamiento de las aguas residuales en Inglaterra y Gales.....	33
2.1.5. Tratamiento de las aguas residuales en Estados Unidos.....	34
2.2. GENERALIDADES DEL TRATAMIENTO DE AR.....	34
2.3. TIPOS DE TRATAMIENTO DE AR.....	37
2.3.1. Pretratamiento o tratamiento preliminar.....	37
2.3.1.1. Desbaste.....	37
2.3.1.2. Desarenadores.....	38
2.3.2. Tratamiento primario.....	39
2.3.2.1. Decantación primaria.....	39
2.3.2.2. Tratamientos fisico-químicos.....	40
2.3.3. Tratamiento secundario.....	40
2.3.4. Tratamiento terciario.....	41
2.3.5. Otros procesos.....	41
CAPÍTULO 3.....	43
Lagunas de Estabilización en la Universidad de Piura.....	43
3.1. LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.....	44
3.1.1. Lagunas aeróbicas.....	44
3.1.2. Lagunas anaeróbicas.....	45
3.1.3. Lagunas facultativas.....	45

3.2.	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN LA UDEP	46
3.2.1.	Descripción de la operación del sistema de tratamiento	47
3.3.	INVESTIGACIONES REALIZADAS EN LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	48
3.3.1.	Investigación para la caracterización de la napa freática en relación con los efluentes	48
3.3.2.	Proyecto de reforestación	48
3.3.3.	Molino de viento	48
3.3.4.	Humedal artificial de flujo vertical (HAFV)	48
3.3.5.	Monitoreo continuo mediante el uso de una balsa	49
3.4.	PROBLEMÁTICA DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA UDEP	49
CAPÍTULO 4		51
	Sistemas blandos para el tratamiento de aguas residuales	51
4.1.	SISTEMAS BLANDOS	52
4.1.1.	Tipos de sistemas blandos	52
4.2.	HUMEDALES	56
4.2.1.	Humedales en el Perú	56
4.2.2.	Fitodepuración en humedales	59
4.2.3.	Tipos de humedales	60
4.2.3.1.	Humedales naturales	60
4.2.3.2.	Humedales artificiales	62
4.3.	HUMEDALES ARTIFICIALES PARA LA DEPURACIÓN	63
4.3.1.	Tipos de humedales artificiales	64
4.3.1.1.	Humedales de flujo superficial	64
4.3.1.2.	Humedales de flujo sub-superficial	65
4.3.1.3.	Filtro de macrofitas en flotación "FMF"	66
4.4.	DESCRIPCIÓN DE LOS FILTROS CON MACROFITAS EN FLOTACIÓN	66
4.4.1.	Estructura de una macrofita	70
4.4.2.	Selección de la typha a utilizar	73
4.4.3.	Clases de depuradoras de filtro de macrofitas en flotación	74
4.4.4.	Fundamentos del sistema de filtro de macrofitas en flotación	77
4.4.5.	Ventajas y desventajas del sistema	79
4.4.5.1.	Ventajas	79
4.4.5.2.	Desventajas	79
4.4.6.	Aplicaciones en fitodepuración	79
4.4.7.	Comparación de dos tipos de tratamiento de agua residual	80
CAPÍTULO 5		83
	Optimización del tratamiento de aguas residuales de uso doméstico, en el sistema de lagunas de oxidación de la Universidad de Piura	83
5.1.	PROCEDIMIENTO DE INSTALACION	84
5.2.	INSTALACIONES	85
5.2.1.	Laguna Primaria	86
5.2.2.	Laguna Secundaria	86
5.2.3.	Homogenización	87
5.2.4.	Cálculos	87
5.3.	REUSO Y MUESTRAS	96
5.4.	PRESUPUESTO	97
	Conclusiones y recomendaciones	99
	Conclusiones generales	99
	Conclusiones específicas: lagunas de la Universidad de Piura (capítulo 3)	101
	Conclusiones específicas respecto a la bioremediación (Capítulo 4)	101
	Conclusiones del diseño y futuro proyecto	103
	RECOMENDACIONES	104
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales domésticas, una preocupación extendida en todo el mundo, dada la necesidad de descontaminación de los cuerpos de agua y de aprovechar al máximo el agua existente, ha sido objeto de investigaciones importantes, fruto de las cuales están los diversos sistemas clásicos: lodos activados, zanjones de oxidación, lagunas aireadas, filtros biológicos, sistemas anaerobios, campos de infiltración, etc. Un ejemplo es el sistema de lagunas de estabilización de la Universidad de Piura, construido en 1985, fue puesto en marcha en 1986, después de 27 años de trabajo se hace evidente la necesidad de evaluar el sistema con la finalidad de optimizar su operación, mediante métodos que sean sostenibles. En el presente trabajo, se procederá a realizar el estudio de bibliografía, para la evaluación y optimización de dicho sistema. Este trabajo ha sido dividido en seis capítulos:

El primer capítulo contiene los conceptos básicos sobre las características de las aguas residuales en general y también en el Perú, así como las normas vigentes que rigen este tipo de vertidos.

En el segundo capítulo se expone como se encuentran los sistemas de tratamiento en el Perú y el mundo, y los diferentes tipos de tratamientos de agua residual doméstica.

El tercer capítulo contiene los conceptos básicos sobre lagunas de estabilización, y el diseño de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura, así como las diferentes investigaciones que se realizaron en dichas lagunas, y los problemas que se presentan en ellas.

En el cuarto capítulo se determinan los diferentes tipos de sistemas blandos que existen, de ellos, los humedales, así como los conceptos necesarios para el conocimiento sobre este tema, la localización de estos humedales en la región, la descripción de la fitodepuración y macrofitas, y por último las ventajas y desventajas del sistema elegido como mejor solución.

En el quinto capítulo se presenta el proyecto que se desea realizar a futuro en las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura, así como los diferentes cambios para poder llevar a cabo el futuro proyecto.

En el último capítulo se dan a conocer las conclusiones más importantes y las recomendaciones de esta presente tesis.

Capítulo 1

Aguas residuales domésticas (ARD)

1.1. Antecedentes

Las aguas residuales domésticas se producen como consecuencia de las distintas funciones que se realizan en una vivienda (lavado de vajillas, desechos humanos, grasas, etc.). Es una fuente de agua indirecta, contaminada, dada su procedencia. También son conocidas como aguas negras. Se dice que es una fuente indirecta porque tienen que ser tratadas para así poder eliminar los elementos que la contaminan. Sin embargo, la producción de aguas negras tratadas convenientemente, supone un aporte de agua para fines de gran valor práctico en las zonas áridas, caso de la costa peruana.

La producción potencial de agua residual doméstica, según datos del año 2007, es de 747,3 millones m³ por año¹, que convenientemente tratadas podrían teóricamente irrigar más de 700 000 ha o 7000 km², es decir, el 15% de la costa peruana. La situación es muy diferente puesto que las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) existentes tienen una capacidad limitada de tratamiento del 14,7%²; el resto de aguas son emitidas con un tratamiento defectuoso, o sin tratamiento a los cuerpos de agua existentes, ríos, reservorios, bahías, etc., contribuyendo gravemente a su contaminación.

El aumento de población e industrias, hace que la propagación de aguas residuales sea uno de los primeros problemas ambientales, generando contaminación del agua. La carencia de tratamiento de estas aguas residuales genera grandes problemas medio ambientales y sanitarios (enfermedades gastrointestinales contribuyentes a la mortalidad infantil).

1.2. Origen

Para efectos de gestión se asigna a cada persona un consumo de agua potable variable de acuerdo a sus circunstancias (nivel económico, ubicación geográfica, etc.) pudiendo

¹ Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS del Perú y propuestas de solución” – SUNASS, Noviembre 2008, pág. 30. Lima, Diciembre 2012.

² Ibídem.

considerarse un promedio de 150 litros de agua por día. Las aguas residuales son un producto inevitable de la actividad humana. Proviene de las diferentes actividades domésticas, y se vuelven aguas residuales municipales cuando son transportadas por la alcantarilla de la ciudad. Estos desechos se caracterizan por contener materia orgánica, grasas y detergentes en alto contenido.

A excepción del agua de riego, casi toda el agua consumida sale por las tuberías de desagüe, juntándose con los diferentes tipos de agua que se generan en una ciudad, para así dirigirse a la PTAR correspondiente si es que hubiese; caso contrario va hacia el silo o simplemente es vertido en el cuerpo de agua más cercano.

La cantidad de vertido por unidad de tiempo que va a llegar a la instalación de la PTAR depende de la población servida. El caudal de las aguas residuales suele estimarse en función del caudal potable suministrado a la red por los servicios municipales, considerando diferentes pérdidas que provocan que el caudal sea inferior al de agua potable suministrada³.

1.3. Características de las aguas residuales

En la Tabla 1 se presenta la composición típica de las ARD.

Tabla 1: Composición típica de las ARD⁴

Parámetro	Unidad	Magnitud
Sólidos totales	mg/L	720
Sólidos disueltos	mg/L	500
Sólidos disueltos volátiles	mg/L	200
Sólidos suspendidos	mg/L	220
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	165
Sólidos sedimentables	mL/L	10
DBO	mg/L	220
COT⁵	mg/L	160
DQO	mg/L	500
Nitrógeno total	mg/L-N	40
Nitrógeno orgánico	mg/L-N	15
Nitrógeno amoniacal	mg/L-N	25
Nitritos	mg/L-N	0
Nitratos	mg/L-N	0
Fósforo total	mg/L-P	8
Fósforo orgánico	mg/L-P	3
Fósforo inorgánico	mg/L-P	5
Cloruros	mg/L-Cl	50
Alcalinidad	mg/L-CaCO ₃	100
Grasas	mg/L	100

³ Moreno, M. Depuración por lagunaje de aguas residuales. Manual de operadores. Marfil, S.L, 1991.

⁴ Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse, 2^a ed., McGraw Hill, 1972.

⁵ Carbono orgánico total

En la Tabla 2, se describe de manera breve y generalizada, los efectos más importantes de los principales agentes de contaminación de las aguas residuales.

Tabla 2: Efectos indeseables de las aguas residuales⁶

Contaminante	Efecto
Materia orgánica biodegradable⁷	Desoxigenación del agua, muerte de peces, olores indeseables.
Materia suspendida⁸	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 trastorna la cadena alimenticia.
Sustancias corrosivas, cianuros metales, fenoles.	Extinción de peces y vida acuática, destrucción de bacterias, interrupción de la auto-purificación.
Microorganismos patógenos	Las ARD pueden transportar organismos patógenos, residuos de curtiembre ántrax.
Sustancias que causan turbiedad, temperatura, color, olor.	El incremento de temperatura afecta a los peces; el color, olor y turbiedad hacen estéticamente inaceptable el agua para uso público.
Sustancias o factores que trastornan el equilibrio biológico.	Pueden causar crecimiento excesivo de hongos o plantas acuáticas, que alteran el ecosistema acuático, causan olores, etc.
Constituyentes minerales	Aumentan la dureza, limitan los usos industriales sin tratamiento especial, incrementan el contenido de sólidos disueltos a niveles perjudiciales para los peces o la vegetación, contribuyen a la eutrofización del agua.

En la Tabla 3, se especifican los contaminantes de importancia en las aguas residuales.

⁶ Klein, L. Ricin Pollution 2, Causes and Effects, Butterworth, 1962.

⁷ Materia orgánica biodegradable: Puede ser atacada o reducida (descompuesta) por los seres vivos. (Extraído de internet: <http://www.manualdelombricultura.com/glosario/pal/38.html>).

⁸ Materia suspendida: Partículas muy pequeñas, que no se pueden quitar por medio de deposición.

Tabla 3: Contaminantes de importancia de las AR⁹

Contaminante	Parámetro típico de medida	Impacto ambiental (IA)
Materia orgánica biodegradable	DBO ¹⁰ , DQO ¹¹	Desoxigenación del agua, generación de olores.
Materia suspendida	SST ¹² , SSV ¹³	Causa turbiedad en el agua, deposita lodos.
Patógenos	CF ¹⁴	Hace el agua insegura para consumo y recreación.
Amoníaco	NH ₄ ⁺ - N	Desoxigena el agua, es tóxico para organismos acuáticos y puede estimular el crecimiento de algas.
Fósforo	Orto-fosfatos	Puede estimular el crecimiento de algas.
Materiales tóxicos	Como cada material tóxico específico	Peligroso para la vida vegetal y animal.
Sales inorgánicas	SDT ¹⁵	Limita los usos agrícolas e industriales del agua.
Energía térmica	Temperatura	Reduce la concentración de saturación de oxígeno en el agua, acelera el crecimiento de organismos acuáticos.
Iones de hidrógeno	pH	Riesgo potencial para organismos acuáticos. Puede llegar a inhibir la nutrición natural de las plantas.

En los acápites siguientes se explican las principales características de las ARD.

1.3.1. Características físicas

1.3.1.1. 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.

⁹ Rich, L. Low Maintenance, Mechanically Simple Wastewater Treatment Systems, Mc Graw Hill, 1980.

¹⁰ Demanda biológica de oxígeno.

¹¹ Demanda química de oxígeno.

¹² Sólidos suspendidos totales.

¹³ Sólidos suspendidos volátiles.

¹⁴ Coliformes fecales.

¹⁵ Sólidos disueltos totales.

1.3.1.2. 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.

1.3.1.3. 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 residuales¹⁶.

1.3.1.4. Sólidos

Existen diferentes tipos de sólidos que se encuentran en las aguas negras. Los sólidos totales son aquellos que se quedan después de evaporar toda el agua; los sólidos disueltos son las moléculas orgánicas e inorgánicas; los sólidos en suspensión, los retiene el decantador y pueden diferenciarse en sedimentables (se separan por sedimentación) y no sedimentables (coloides). Eventualmente aparecen en la superficie de las lagunas anaeróbicas sólidos flotantes, que son producidos por el desprendimiento del metano en el fondo de la laguna¹⁷.

1.3.2. Características químicas

1.3.2.1. Materia orgánica

Es importante este parámetro porque puede generar la desoxigenación, y consecuentemente la muerte de seres aeróbicos en los cuerpos de agua receptores. Las formas de denominación más conocidas, son:

- DBO₅ (Demanda biológica de oxígeno a los cinco días), es el parámetro de polución orgánica más utilizado y aplicable a las aguas residuales y superficiales. Indica la cantidad de oxígeno disuelto que se consume en un agua residual durante 5 días a 20°C. Reproduce el consumo de oxígeno que se ocasionaría con ese vertido en el medio natural. Los datos de la DBO se utilizan para dimensionar las instalaciones de tratamiento y medir el

¹⁶ Metcalf & Eddy. Ingeniería de Aguas Residuales. Vol. 1. Tratamiento, vertido y reutilización. 3era ed. Madrid, 1998.

¹⁷ Benavent Trullenque, Ignacio. Comunicación personal.

rendimiento de algunos de estos procesos. Se puede calcular asimismo la velocidad a la que se requerirá el oxígeno¹⁸.

- DQO (Demanda bioquímica de oxígeno), cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente toda la materia orgánica contenida en la muestra de agua. El equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse se mide utilizando un fuerte agente químico oxidante en medio ácido (dicromato potásico). El ensayo debe realizarse a temperatura elevada. Los valores de DQO de un agua residual son, por lo general, mayores que la DBO porque es mayor el número de compuestos que pueden oxidarse por vía química que biológicamente¹⁹.

1.3.2.2. Materia inorgánica

- Oxígeno disuelto (OD), indica el grado de contaminación de un agua. Es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios así como para otras formas de vida aerobia. El oxígeno es solo ligeramente soluble en el agua. La cantidad real de oxígeno que puede estar presente en la solución viene regida por²⁰:

- a) La solubilidad del gas.
- b) La presión parcial del gas en la atmósfera.
- c) La temperatura.
- d) La pureza del agua (salinidad, sólidos suspendidos, etc.)

1.3.2.3. pH

El pH es un indicador de la concentración del ion hidrógeno, es un parámetro importante de calidad tanto de las aguas naturales como de las residuales. El valor óptimo para el crecimiento de los organismos oscila entre 6,5 y 7,5. Si no se encuentra entre dichos valores, puede que sea más difícil el tratamiento por medios biológicos. El agua residual con una concentración adversa de ion hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos y si la concentración no se altera antes de la evacuación, el efluente puede alterar la concentración de las aguas naturales²¹.

1.3.3. Características biológicas

1.3.3.1. Bacterias

Los organismos más importantes en la descomposición y estabilización de la materia orgánica se clasifican como cocos, bacilos, vibriones, espiroquetas y filamentosas²².

¹⁸ Rich, L. Low Maintenance, Mechanically Simple Wastewater Treatment Systems, Mc Graw Hill, 1980.

¹⁹ Rich, L. Low Maintenance, Mechanically Simple Wastewater Treatment Systems, Mc Graw Hill, 1980.

²⁰ Metcalf, E. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. 1era ed., 1977.

²¹ *Ibidem*.

²² Romero, J. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. 3a ed. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.

Existen bacterias (anaerobias) que consumen el oxígeno procedente de los sólidos orgánicos; otras (aerobias) que necesitan oxígeno del agua para poder alimentarse y respirar, a éstas les sirve el oxígeno libre del agua (molecular) proveniente del oxígeno disuelto (OD); de otro lado, las bacterias facultativas, son aquellas que pueden adaptarse al medio opuesto; por último se encuentran las bacterias coliformes, éstas sirven como indicadores de contaminación, y patógenos²³.

1.3.3.2. Organismos coliformes

El tracto intestinal del hombre contiene innumerables bacterias en forma de bastoncillo, conocidas como organismos coliformes. Cada persona evacúa de 100 000 a 400 000 millones de organismos coliformes por día, además de otras clases de bacterias. Los organismos coliformes no son dañinos al hombre y, de hecho, son útiles para destruir la materia orgánica en los procesos biológicos de tratamiento de las aguas residuales²⁴.

Los organismos patógenos (Tabla 4²⁵) son los evacuados por los seres humanos afectados o portadores de alguna enfermedad en particular. Tales como, fiebre tifoidea, disentería, diarrea y, en ciertas partes del mundo, el cólera²⁶.

²³ Romero, J. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. 3a ed. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.

²⁴ Metcalf, E. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. 1era ed., 1977.

²⁵ Valdéz E. y Vásquez A. Fundación ICA. Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. México, Mayo 2003.

²⁶ Romero, J. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. 3a ed. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.

Tabla 4: Patógenos comunes transportados por el agua

	Microorganismos	Patógenos
Bacterias	Francisella tularensis	Tularemia
	Leptospira	Leptospirosis
	Salmonella para typhi (A, B, C)	Paratifoidea (fiebre entérica)
	Salmonella typhi	Fiebre tifoidea, fiebre entérica
	Shigella (S. Flexneri, S. Sonnei, S. Dysenteriae, S. Boydii)	Shigelosis (disentería bacilar)
	Vibrio comma (Vibrio cholerae)	Cólera
Virus	Poliomyelitis (3 tipos)	Poliomyelitis aguda, parálisis infantil.
	Virus desconocidos	Hepatitis infectosa
Protozoarios	Entamoeba histolytica	Amebiasis (disentería amebiana, enteritis amebiana, colitis amebiana)
	Giardia lanblia	Giardiasis (enteritis guardia, lambliasis)
Helmintos (gusanos parásitos)	Dracunculus medinensis	Dracontiasis (dracunculiasis; dracunculosis; medina, infección serpiente, dragón o gusano-guinéa)
	Echinococcus	Equinococosis
	Shistosoma (S. Mansoni, S. Japonicum, S. Haematobium)	Squistosomiasis (biharziasis o enfermedad de “Bill Harris”)

Dado que el número de organismos patógenos presentes en las aguas residuales y, en general en aguas contaminadas son pocos y difíciles de aislar, el organismo coliforme, que es más numeroso y de determinación más sencilla, se utiliza como organismo indicador. Su ausencia indica que el agua se halla exenta de organismos productores de enfermedades²⁷.

1.3.4. Componentes que generan eutrofización

La eutrofización es un problema de calidad del agua importante en lagos y embalses. Consiste en un proceso de evolución natural en el tiempo, en el que el agua se enriquece de oxígeno, provocando un aumento de plantas acuáticas, la transformación en zona pantanosa y, en última instancia, transformación en terreno seco. La eutrofización se puede acelerar mediante la adición de nutrientes por parte del hombre²⁶.

²⁷ Romero, J. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. 3a ed. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.

Dichos nutrientes pueden estar presentes de forma orgánica o inorgánica, se encuentran en residuos humanos, estos son los componentes básicos que generan la eutrofización.

1.3.4.1. Nitrógeno

Los elementos nitrógeno y fósforo son esenciales para el crecimiento de protistas y plantas. El nitrógeno es absolutamente básico para la síntesis de las proteínas. Se encuentra presente en el agua residual reciente, principalmente en forma de urea y materia proteica. Se necesitará conocer su procedencia sobre el mismo para valorar la tratabilidad de las aguas residuales domésticas e industriales mediante procesos biológicos. Cuando el contenido de nitrógeno sea insuficiente se necesitará la adición del mismo para hacer tratable el agua residual; sin embargo cuando sea necesario el control del crecimiento de algas en el agua receptora para proteger los usos a que se destine, puede ser conveniente la eliminación o reducción del nitrógeno en las aguas residuales antes de la evacuación. La edad del agua residual viene indicada por la cantidad relativa de amoníaco presente. En un ambiente aerobio, las bacterias pueden oxidar el nitrógeno del amoníaco a nitritos y nitratos²⁸.

1.3.4.2. Fósforo

También es esencial para el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Debido a los crecimientos explosivos nocivos que tienen lugar en las aguas superficiales, existe mucho interés en la actualidad en controlar la cantidad de los compuestos de fósforo que entran en las aguas superficiales a través de los vertidos de aguas residuales industriales y domésticas, y de las escorrentías naturales²⁹.

1.4. Aguas residuales en el Perú

A Noviembre del 2008, el 63,6% de la población urbana total tenía servicio de alcantarillado, el resto era administrado por las empresas prestadoras de servicio (EPS); el resto fue administrado directamente por las municipalidades o a través de operadoras especializadas (OES) en pequeñas ciudades, comités de agua o simplemente no contaba con dicho servicio³⁰.

En relación con este importante tema en la emisión de las aguas residuales, existen diversas organizaciones involucradas en el Perú, con diferentes competencias y limitaciones operativas, frecuentes derivadas de una desarticulación importante y falta de medios económicos.

²⁸ Romero, J. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. 3a ed. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.

²⁹ Ibídem.

³⁰ Méndez, J.P Y Marchan, J. Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las EPS del Perú y propuestas de solución. RyF Publicaciones y servicios S.A.C. Lima, 2008.

Son varias organizaciones del sector que tienen competencia del tema saneamiento, pero ejercen sus funciones de manera parcial y desarticulada por limitaciones operativas, económicas, sociales y políticas. En la Tabla 5, se especifican organizaciones en el sector.

Tabla 5: Competencia y limitaciones de las organizaciones vinculadas directa e indirectamente al sector saneamiento.

Organización	Competencia	Sistema	Limitación
Empresas Prestadoras de Servicios (EPS)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gestionar, operar y mantener eficientemente las PTAR. ✓ Tramitar ante la DIGESA la AS²⁰ del tratamiento de aguas residuales y disposición sanitaria de aguas residuales domésticas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 11,2% PTAR inoperativas. ✓ 35,7% PTAR sin mantenimiento. ✓ 43,3% PTAR sobrecargada de caudal. ✓ 55,2% PTAR sin cribas. ✓ 72% PTAR sin desarenador. ✓ 60,8% de las PTAR sin medidor de caudal. ✓ 66% PTAR con eficiencia de remoción de DBO₅ < 80% ✓ 48% PTAR con eficiencia de remoción de CF < 99% 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ausencia de recursos económicos y humanos para las O&M, obtención de las AS³¹, formulación y evolución de proyectos del SNIP. ✓ Administración del servicio como centro de costos y no como centro de beneficios. ✓ Acumulación de pasivos (FONAVI, endeudamiento, etc.). ✓ Limitación para supervisión de obras convocadas por otras entidades (municipales, gobiernos regionales) que serán transferidas a las EPS.
DIGESA (Autoridad Sanitaria)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Otorgar la autorización sanitaria para el funcionamiento de las PTAR. ✓ Establecer los plazos de regularización de las PTAR que no cuentan con AS¹¹. ✓ Sancionar el incumplimiento de la Ley General de Aguas y su reglamento. ✓ Supervisar y fiscalizar la correcta O&M de las PTAR. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 6,3% de las PTAR con AS vigente. ✓ 0% de plazos establecidos de oficio. ✓ Ninguna EPS sancionada. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Insuficientes recursos para efectuar acciones de oficio. ✓ Ausencia de reglamento de infracciones y sanciones.
Ministerio de Ambiente (MINAM)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dirigir el sistema nacional de gestión ambiental (Entidad lateral al sistema de 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ECA de agua aprobado el 31.07.2008. ✓ LMP de emisiones 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reglamento de implementación de ECA agua (pendiente). ✓ Debe esperar la opinión favorable

³¹ Autoridad Sanitaria.

	<p>saneamiento). Dirige el sistema de gestión ambiental.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Elaborar y aprobar los ECA y LMP. 	<p>industriales al sistema de alcantarillado (pendiente).</p>	<p>de los sectores, falta aplicar Silencio Administrativo Positivo.</p>
<p>Dirección General de Capitanías y Guardacostas (DICAPI)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ejercer control y vigilancia para prevenir y combatir los efectos de la contaminación del mar, ríos y lagos navegables. ✓ Sancionar administrativamente a los infractores. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Intervenciones mínimas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ DIGESA debe primero establecer las metas de calidad de cada vertimiento en la autorización sanitaria o estos deben estar establecidos en el PAMA aprobado por el sector correspondiente.
<p>SUNASS</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Regular los servicios de las EPS. ✓ Aprobar planes maestros optimizados (PMO) que incluyan costos de O&M de las PTAR y el servicio de la deuda. ✓ Establecer metas de calidad del servicio de AR. ✓ Autorizar los incrementos tarifarios necesarios. ✓ Fiscalizar que a O&M de las PTAR cumplan las normas técnicas. ✓ Supervisar y sancionar el incumplimiento de metas. ✓ Fijar la tarifa por venta de AR. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se ha propuesto modificar las estructuras tarifarias para incorporar la variable calidad de los desagües industriales. ✓ 12/50 empresas con PMO al mes de agosto del 2008. ✓ Los PMO aprobados no establecen metas de calidad del servicio de tratamiento de AR, solo metas de cobertura de AR. ✓ Diversas acciones de supervisión, fiscalización y sanción en materia de tratamiento de aguas residuales. ✓ No se ha fijado la tarifa de venta de AR. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Largo proceso de aprobación de PMO. ✓ DIGESA previamente debe entregar la AS para fijar las metas de calidad de efluentes de PTAR. ✓ Retraso en aprobación de LMP de efluentes industriales dificulta la formulación de una tarifa por exceso de carga contaminante.

<p>Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elaborar y dirigir la política sectorial en materia de tratamiento de AR. ✓ Canalizar el financiamiento para el tratamiento de AR. ✓ Promover la construcción de PTAR. ✓ Promover la participación del sector privado. ✓ Promover la sostenibilidad de las inversiones. ✓ Aprobar los PAMA de las PTAR existentes que no cumplen los niveles de calidad de sus efluentes. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sostenibilidad de las inversiones en riesgo por ineficiencia operativa y ausencia de mantenimiento. ✓ Dos proyectos de participación del sector privado en el tratamiento de AR (La Chira y La Taboada). ✓ 12 PAMA aprobados por el sector para la obtención de la autorización sanitaria de DIGESA. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Presión por ejecutar inversiones. ✓ Insuficiente capacidad fiscalizadora y resolutoria para aprobar EIA y PAMAs.
<p>Ministerio de Economía y Finanzas (MEF)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Normar y dirigir el Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP). ✓ Avalar los endeudamientos extremos. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 369 millones de dólares invertidos. ✓ Supuesto de sostenibilidad del SNIP³² la transferencia a las EPS, pero no es la inclusión en el PMO y su aprobación para cubrir los costos de O&M. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Presión por viabilizar inversiones rápidamente y asegura el uso eficiente de los fondos. ✓ Largo proceso para otorgar viabilidad de inversiones. ✓ Recursos humanos de unidades formuladoras insuficientemente formados y capacitados.

Fuente: Méndez, J. Y Marchan, J. "Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las EPS del Perú y propuestas de solución". RyF Publicaciones y servicios S.A.C. Lima, 2008.

³² Sistema Nacional de Inversión Pública.

1.5. Legislación peruana relacionada a las ARD

1.5.1. Normas Peruanas Generales

A continuación se señalan algunas de las normas peruanas significativas en relación con la tesis; por su número pequeño y ser de lectura rápida he preferido colocarlas dentro del trabajo y no como anexo.

- Decreto Legislativo N° 635 (08/04/1991)

Artículo **304**, se señala que “la persona que, infringiendo las normas sobre protección del medio ambiente, lo contamina vertiendo residuos sólidos, líquidos, gaseosos o de cualquier otra naturaleza por encima de los límites establecidos, que causen o puedan causar perjuicio o alteraciones en la flora, fauna y recursos hidrobiológicos, será reprimida con una pena privativa de libertad, no menor de uno ni mayor de tres años y con ciento ochenta a trescientos sesenta y cinco días-multa”.

Artículo **307**, se establece que “la persona que deposita, comercializa o vierte desechos industriales o domésticos en lugares no autorizados o sin cumplir con las normas sanitarias y de protección del medio ambiente, será reprimida con pena privativa de libertad no mayor de dos años”.

- Ley General de Servicios de Saneamiento: Ley N° 26338 (24/07/1994)

Esta ley establece las normas que rigen la prestación de los servicios de saneamiento. Comprende la prestación regular de servicios de agua potable, alcantarillado sanitario y pluvial, y la disposición sanitaria de excretas, tanto en el ámbito urbano como en el rural.

En el artículo **9**, se establece que “corresponde a la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), garantizar a los usuarios la prestación de los servicios de saneamiento en las mejores condiciones de calidad, contribuyendo a la salud de la población y a la preservación del ambiente”.

- Decreto Supremo N° 09-95-Pres. Reglamento de la Ley General de Servicios de Saneamiento (28/08/1995)

El presente reglamento regula la aplicación de la Ley General de Servicios de Saneamiento y comprende las disposiciones relativas a las condiciones de la prestación regular; las funciones, atribuciones, responsabilidades, derechos y obligaciones de las entidades; y los regímenes empresariales, la regulación de tarifas, la participación del sector privado y el uso de bienes públicos y de terceros para la prestación de estos servicios.

En el artículo **20**, se indica que “en los casos que por circunstancia fortuita o de fuerza mayor, se comprometa la calidad del agua potable, la EPS deberá alertar de inmediato a la población, por todos los medios de difusión disponibles en la zona e instruirle en la manera de utilizar el agua bajo esas circunstancias”.

En el artículo **23** se establece que “en precisión de la ocurrencia de situaciones fortuitas o de fuerza mayor tales como desastres que causen interrupciones, restricciones o racionamientos, la EPS debe contar con planes para superar o por lo menos mitigar sus efectos sobre la población”.

- **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)**

En el artículo **10**, se señala los sistemas que integran los servicios de saneamiento son los siguientes:

Servicio de Agua Potable

- Sistema de Producción, que comprende: Captación, almacenamiento y conducción de agua cruda; tratamiento y conducción de agua tratada.
- Sistema de distribución, que comprende: Almacenamiento, redes de distribución y dispositivos de entrega al usuario: conexiones domiciliarias inclusive la medición, pileta pública, unidad sanitaria u otros.

Servicio de Alcantarillado Sanitario y Pluvial

- Sistema de recolección, que comprende: Conexiones domiciliarias, sumideros, redes y emisores.
- Sistema de tratamiento y disposición de las aguas servidas.
- Sistema de recolección y disposición de aguas de lluvias.

Servicio de Disposición Sanitaria de Excretas Sistema de letrinas y fosas sépticas.

- **Política de Estado N°19 – Desarrollo Sostenible y Gestión Ambiental (22/07/2002)**

Plantea “Integrar la política nacional ambiental con las políticas económicas, sociales y culturales del país, para contribuir a superar la pobreza y lograr el desarrollo sostenible del Perú, promoviendo la institucionalidad de la gestión ambiental pública y privada que facilite el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, la diversidad biológica, la protección ambiental y el desarrollo de centros poblados y ciudades sostenibles, con el objetivo de mejorar la calidad de vida, preferentemente con énfasis en la población más vulnerable del país”.

- **Decreto Supremo N°28611. Ley General del Ambiente (15/10/2005)**

En el Artículo **31**: “Del Estándar de Calidad Ambiental”, numeral 31.3, establece que no se otorgará la certificación ambiental establecida mediante la Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental, cuando el respectivo EIA concluye que la implementación de la actividad implicaría el incumplimiento de algún Estándar de Calidad Ambiental. Por otro lado, los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental también deben considerar los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) al momento de establecer los compromisos ambientales respectivos.

En el Artículo **120**: “De la protección de la calidad de las aguas” del Capítulo 3 “Calidad Ambiental”, el Estado promueve el tratamiento de las aguas residuales con fines de

utilización, considerando como premisa la obtención de la calidad necesaria para su reuso, sin afectar la salud humana, el ambiente, las actividades en las que se reutilizarán.

En el Artículo **121**: “Del vertimiento de aguas residuales”, del Capítulo “Calidad Ambiental”, el Estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes.

En el Artículo **122**: “Del tratamiento de residuos líquidos” del Capítulo 3 “Calidad Ambiental”, en el numeral 122.2 establece que el sector Vivienda, Construcción y Saneamiento es responsable de la vigilancia y sanción por el incumplimiento de los Límites Máximos Permisibles (LMP) en los residuos líquidos domésticos, en coordinación con las autoridades sectoriales de alcantarillado público. Además, en el numeral 122.3, establece que las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización y otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con los establecidos en las normas legales vigentes.

- **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)**

En el artículo **4**, se señalan las definiciones en aplicación de la Ley General y el presente reglamento entiéndase por:

- Agua potable: Agua apta para el consumo humano, de acuerdo con los requisitos físico-químicos y microbiológicos establecidos por la normatividad vigente.
- Agua servida o residual: Desecho líquido proveniente de las descargas por el uso de agua en actividades domésticas o de otra índole.
- Aguas servidas tratadas o aguas residuales tratadas: Aguas servidas o residuales procesadas en sistemas de tratamiento para satisfacer los requisitos de calidad señalados por la autoridad sanitaria en relación con la clase de cuerpo receptor al que serán descargadas o a sus posibilidades de uso.

En el artículo **5**, se señalan que corresponde a la Municipalidad Provincial, en cumplimiento de lo establecido en la Ley General:

- La responsabilidad de la prestación de los servicios de saneamiento, en todo ámbito de su provincia.

- La constitución de EPS municipales, en forma individual o asociada a otras municipalidades provinciales. Asimismo, la constitución de EPS municipales en forma individual o asociada a otras municipalidades provinciales o distritales.
 - El otorgamiento del derecho de explotación de los servicios de saneamiento a la EPS municipal, privada o mixta, así como la supervisión del cumplimiento del contrato de explotación, concesión y el seguimiento del contrato de administración de servicios, según corresponda.
 - La aprobación de las tarifas, de acuerdo a lo establecido en el artículo 37 de la Ley General y el presente reglamento.
 - El apoyo en la realización de acciones necesarias para la provisión de infraestructura de saneamiento en las localidades carentes de ellas.
- **Decreto Legislativo N° 1055. Decreto Legislativo que modifica la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente (27/06/2008)**

Se modifican los Artículos **32, 42, 43 y 51** de la Ley General del Ambiente. El Artículo **32** “Del Límite Máximo Permisible”, establece que el 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.

- **Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM (23/05/2009). Política Nacional de Ambiente**

La Política Nacional de Ambiente define los objetivos prioritarios, lineamientos, contenidos principales y estándares nacionales de obligatorio cumplimiento. Conformar la política general de gobierno en materia ambiental, la cual enmarca las políticas sectoriales, regionales y locales.

En el Eje de Política 2: Gestión Integral de la Calidad Ambiental, establece como uno de los Lineamientos de Política aplicada a la Calidad del Agua, el promover la inversión en infraestructura de saneamiento básico y de tratamiento y reuso de aguas residuales de origen doméstico y otras actividades generadoras de efluentes.

- **Norma Peruana OS 090**

Artículo **4** disposiciones generales para el diseño básico de una planta de tratamiento de agua residual.

1.5.2. Normas Ambientales y Sanitarias

- **D.S N° 002-2008-MINAM. Aprueban los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua (31/07/2008)**

En el anexo 1 se establecen los ECA para el agua. El dispositivo establece concentraciones de elementos, sustancias o parámetros que puede contener el agua sin afectar la calidad de recursos para determinados usos específicos, estableciendo un total de cuatro categorías.

En la categoría 3, considera a aquellas aguas destinadas al “Riego de vegetales y bebidas de animales”, estableciendo los ECA para parámetros fisico-químicos, inorgánicos, orgánicos y plaguicidas para aquellas aguas usadas indiferentemente para riego de vegetales de tallo alto, como de tallo bajo.

- **D.S 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”**

En el Artículo 1, se establece que “el ámbito de aplicación y obligatoriedad de la norma son las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos y asegura su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de las aguas residuales”.

En el Artículo 2, se establece que “los VMA para las descargas de aguas residuales no domésticas en los sistemas de alcantarillado sanitario son los establecidos en los Anexos N°1 y N°2 incluidos en dicha norma”.

- **D.S N° 023-2009-MINAM. Aprueban disposiciones para la implementación de los ECA para el agua (19/12/2009)**

En el Artículo 2 se establecen las categorías de los ECA, correspondiendo a la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, las siguientes especificaciones:

- Vegetales de tallo bajo: aguas utilizadas para el riego de plantas, frecuentemente de porte herbáceo y de poca longitud de tallo, que usualmente tienen un sistema radicular difuso o fibroso y poco profundo.
- Vegetales de tallo alto: aguas utilizadas para el riego de plantas de porte arbustivo o arbóreo, que tienen una mayor longitud de tallo.

- **D.S N° 003-2010-MINAM “Aprueban LMP para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales domésticas o municipales (16/03/2010)”**

En el Artículo 1 se aprueban los LMP para efluentes de las PTAR domésticas o municipales, presentados en la Tabla 6.

Tabla 6: LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua.

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	10 ⁴
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

En el Artículo 3 “Cumplimiento de los LMP de efluentes de PTAR” establece en 3.3 que los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la fecha de dicho D.S y que no cuenten con Certificación Ambiental, tendrán un plazo no mayor de 2 años, para presentar su PAMA ante el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, quien definirá el respectivo plazo de adecuación.

Capítulo 2

Tratamiento de Aguas Residuales

Se puede decir que el objetivo principal del tratamiento de aguas residuales es doble¹:

- a) La conversión del agua residual proveniente del uso doméstico, en un efluente final aceptable a las condiciones del ambiente.
- b) Para las condiciones del ambiente intermedio y final, la disposición adecuada de los sólidos (lodos) obtenidos durante el proceso de purificación.

La prevención de la polución del agua y del suelo es posible si se definen técnicas apropiadas de tratamiento y disposición de las aguas residuales³³.

La cantidad total de excremento humano húmedo es aproximadamente 80 a 270 gr/persona/día y la cantidad de orina es de 1 a 1,3 kg/persona/día. El 20% de la materia fecal y el 2,5% de la orina son material orgánico putrescible²; por lo que el ARD es un riesgo para la salud del ser humano (vid acápite **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y para el ambiente comprometido. De ahí que el objetivo general del tratamiento de aguas residuales es prevenir el deterioro del ser humano y el ambiente, por ello es imprescindible.

El tratamiento de las aguas residuales puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos. Todos los métodos se basan en fenómenos físicos, químicos y biológicos. Los mecanismos de tratamiento pueden ser alterados de diferentes maneras, lo que dará como resultado diferentes capacidades de tratamiento³ y de acuerdo a ello una escala de costos dependiendo del tratamiento a utilizar.

El tratamiento de las aguas residuales, tanto municipales como industriales, incluye y tiene por objetivos:

¹ Rojas, R. "Conferencia, Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales". Curso Internacional: Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales". Setiembre, 2002.

² Romero, J. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. 3a ed. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.

³Fresenius et al. Manual de disposición de aguas residuales, Tomo II. CEPIS. Lima, 1991.

- La retención de las sustancias contaminantes, tóxicas y reutilizables, presentes en las aguas residuales.
- Remoción de DBO.
- Remoción de patógenos.
- Remoción de sólidos suspendidos.
- Remoción de metales pesados, sustancias inorgánicas disueltas, nitrógeno, fósforo, etc.

Se necesita de varios procesos u operaciones para poder conseguir el nivel de calidad adecuado de acuerdo a la normatividad establecida.

2.1. Tratamiento de aguas residuales en el mundo

2.1.1. Tratamiento de las aguas residuales en el Perú

En el Perú de las 143 PTAR que son gestionadas por las EPS, solo el 14,7% tienen autorización sanitaria para su funcionamiento, lo que hace notar la informalidad que existe en nuestro país para llevar un manejo adecuado de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Según el estudio realizado en el 2007 por la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), los sistemas de alcantarillado recolectaron aproximadamente 747,3 millones de m³, el 70,9% pasaron a contaminar los cuerpos de agua superficial que se usan para la agricultura, pesca, recreación e incluso para abastecimiento de agua potable y solo el 29,1% ingresaron a un sistema de tratamiento de agua; esta última cifra tampoco garantizaba un tratamiento adecuado.

Además del déficit de tratamiento. El problema central es la falta de gente capacitada para el mantenimiento, y operación de las plantas. La consecuencia es su deterioro, el abandono final y la mala operación de las plantas. En la mayoría de plantas de tratamiento que hay en el Perú, no se cuenta con la información necesaria (temperatura, caudal de operación o la calidad de los afluentes o efluentes) para actuar con un control correctivo en caso haya algún problema. Sin un medidor de caudal no es posible la cuantificación de la materia orgánica que entra. En el Perú, a Noviembre del 2008, solo el 26,6% de las PTAR mide el caudal afluente (Tabla 1), solo el 70,6% (Tabla 2) de las PTAR tienen datos del nivel de DBO₅ y 69,2% (Tabla 3) de ellas solo disponían de datos del nivel de coliformes fecales⁴. En las siguientes tablas se especifica los datos más importantes del total de PTAR en el Perú. Solo 3 de las 61 PTAR cuyos efluentes se emplean para fines agrícolas, tiene autorización sanitaria o PAMA para el reuso (las 3 primeras PTAR de la Tabla 4).

⁴ Méndez, J. Y Marchan, J. "Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las EPS del Perú y propuestas de solución". RyF Publicaciones y servicios S.A.C. Lima, 2008.

Tabla 1: Control de caudal del afluente

	Total de PTAR: 143	100%
PTAR con medidor de caudal	38	26,6%
PTAR sin medidor de caudal	87	60,8%
PTAR sin información	18	12,6%

Fuente: Información recopilada por la SUNASS de las EPS en el 2008.

Tabla 2: Monitoreo de la calidad a través del DBO₅

	Total de PTAR: 143	100%
PTAR con datos	101	70,6%
PTAR inoperativas	16	11,2%
PTAR sin información	26	18,2%

Fuente: Información recopilada por la SUNASS de las EPS en el 2008.

Tabla 3: Monitoreo de la calidad a través de coliformes fecales

	Total de PTAR: 143	100%
PTAR con datos	99	69,2%
PTAR inoperativas	16	11,2%
PTAR sin información	28	19,6%

Fuente: Información recopilada por la SUNASS de las EPS en el 2008.

Las únicas PTAR que tenían ya sea autorización sanitaria o PAMA, son las especificadas en la Tabla 4, esto se debe a que la Autoridad Sanitaria (DIGESA), no exige que las EPS tramiten la autorización sanitaria y regularicen su situación. De las 21 PTAR, todas pertenecientes al departamento de Lima, solo 9 cuentan con la autorización sanitaria de funcionamiento, las otras 12 solo cuentan con PAMA, aprobado por el MVCS⁵.

⁵ Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Tabla 4: PTAR con autorización⁶

Nombre de la planta	Localidad	R.D N°
Boca del Río	Pisco	0610-00/DIGESA/SA
Centro Sur- Pampas de Atahualpa	Nuevo Chimbote	0471/98/DIGESA/SA
Yaurilla	Parcona	465-99/DIGESA/SA
PTAR Puente Piedra	Puente Piedra	1209/2007/DIGESA/SA
PTAR Ancón	Ancón	PAMA
PTAR Jerusalén	Ancón	PAMA
PTAR Santa Rosa	Santa Rosa	PAMA
PTAR Ventanilla	Ventanilla	PAMA
PTAR Carapongo	Ate-Vitarte	1997/2005/DIGESA/SA
PTAR Nueva Sede Atargea	El Agustino	PAMA
PTAR San Antonio de Carapongo	San Juan de Lurigancho	1286/2003/DIGESA/SA
PTAR San Bartolo	Lurín	0704/2003/DIGESA/SA
PTAR San Pedro de Lurín	Lurín	PAMA
PTAR Julio C. Tello	Lurín	PAMA
PTAR Nuevo Lurín	Lurín	PAMA
PTAR Punta Hermosa	Pachacamac	PAMA
PTAR Pucusana	Pucusana	PAMA
PTAR San Juan	San Juan de Miraflores	0306/2000/DIGESA/SA
PTAR José Gálvez	Villa María del Triunfo	PAMA
PTAR Parque 26	Villa El Salvador	PAMA
PTAR Huáscar	Villa El Salvador	0677/2000/DIGESA/SA

Fuente: Información recopilada por la SUNASS de las EPS en el 2008.

Según información⁷, se tiene que de los 1833 distritos que existen en el Perú; 1521 de ellos reciben servicios a través de las municipalidades, juntas de administración de servicios sanitarios u otro tipo de servicio y solo a 311 de los distritos (17%), se le presta servicio por alguna de las 50 EPS regulada por la SUNASS. Al 2011, solo algo más del 30% del volumen de aguas residuales generadas en el Perú es tratado por las EPS.

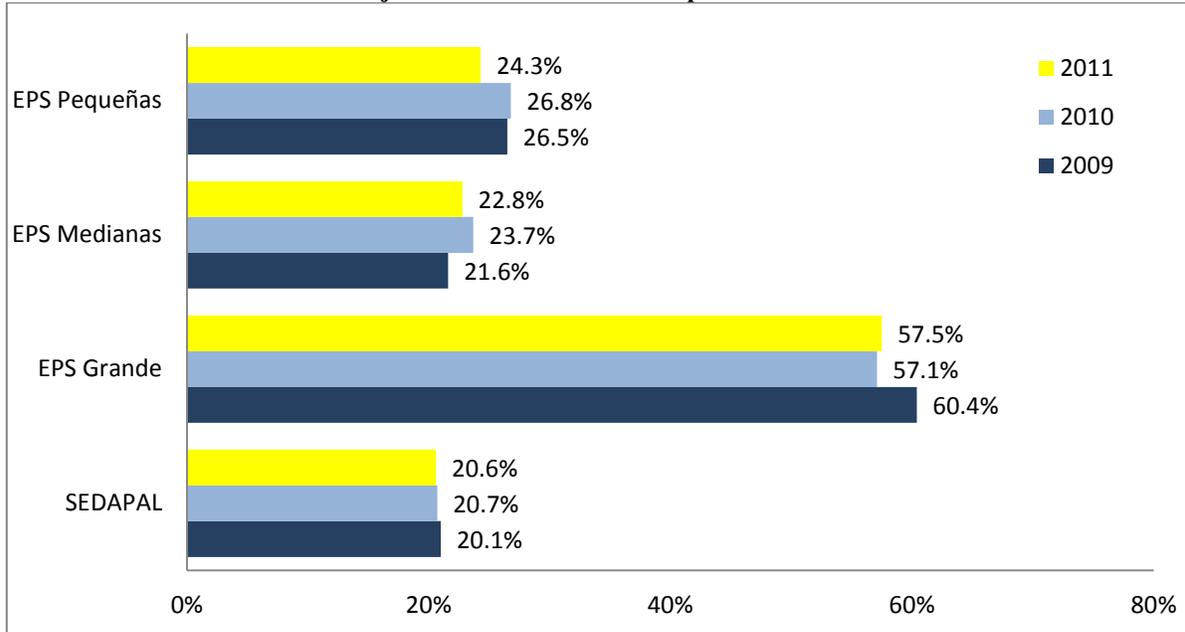
Gráfico 1 se muestra en porcentaje el tratamiento de aguas residuales por tamaño de EPS⁸. También se realizó un estudio comparando la evolución del tratamiento de aguas residuales (Gráfico 2) de los últimos cinco años, separando a SEDAPAL, por tener la mayor cantidad de conexiones.

⁶ Información recopilada por la SUNASS de las EPS en Lima, Agosto de 2008.

⁷ Vergara, A. Las EPS y su desarrollo 2012. Gerencia de supervisión y fiscalización. Julio, 2012. (INFORME).

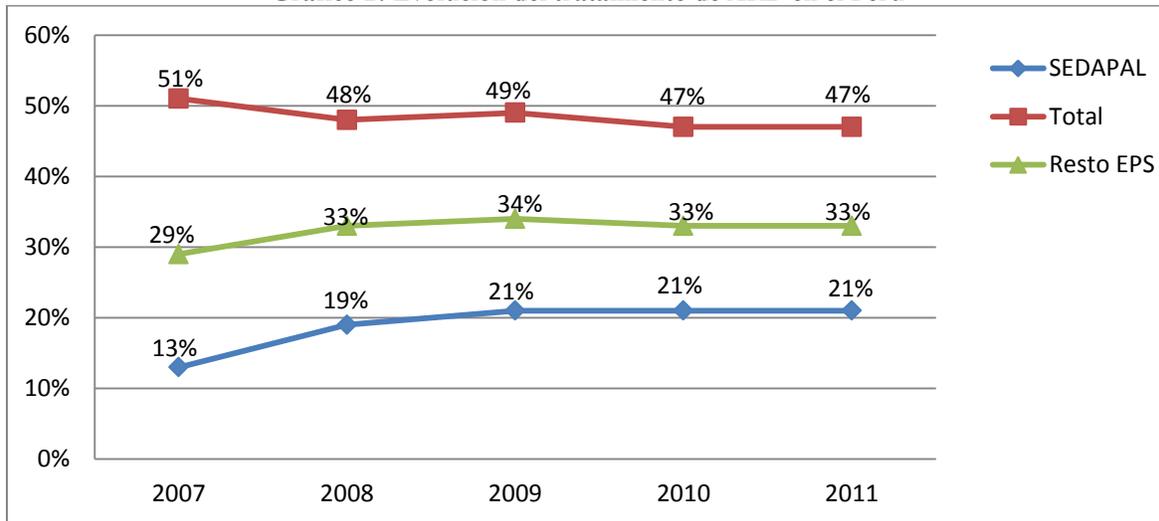
⁸ Separado de la siguiente manera: SEDAPAL (Lima y Callao, más de un millón de conexiones de agua potable), EPS Grandes (entre 40000 – 200000 conexiones), EPS Medianas (15000 – 40000 conexiones) y EPS Pequeñas (2000 – 15000). Datos SUNASS.

Gráfico 1: Porcentaje del tratamiento de ARD por tamaño de EPS en el Perú



Fuente: Información de la EPS, “Las EPS y su desarrollo 2012”

Gráfico 2: Evolución del tratamiento de ARD en el Perú



Fuente: Información de la EPS, “Las EPS y su desarrollo 2012”

Se hace notar que hay una diferencia notable entre la estadística de aguas “tratadas” y la estadística de aguas “tratadas correctamente”. Las principales deficiencias en la operación de las PTAR⁹ son:

- Sobrecarga por exceso de caudal, todo se origina en el desequilibrio entre el incremento de cobertura del alcantarillado y las inversiones para ampliar las

⁹ Información recopilada por la SUNASS de las EPS en Lima, Agosto de 2008.

plantas de tratamiento de aguas residuales, las más sobrecargadas fueron; PTAR Lishner Tudela – ATUSA (1031%), PTAR Pueblo Nuevo – EPS Grau (814%), PTAR 18 Mocupe Nuevo – EPSEL S.A (627%) y PTAR Yaracachi – EPS Moquegua (318%).

- Sobrecarga por exceso de carga orgánica, de 108 PTAR que controlan la calidad de sus afluentes, el 18% (20 PTAR) recibían una concentración de 400 mg/L DBO₅ entre ellas 4 EPS de Piura (PTAR Chulucanas, PTAR Pueblo Nuevo, PTAR Los Órganos y PTAR Paita).

Las principales deficiencias en el mantenimiento de las PTAR¹⁰, se encuentran especificadas en la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5¹¹: Presencia de arenas y lodos en las PTAR

Descripción	Total de PTAR: 116	100%
PTAR arenada y con exceso de lodos	44	37,9%
PTAR sin arenas ni lodos excesivos	43	37,1%
PTAR sin información de estado	29	25%

Tabla 6: Presencia de macrofitas y maleza en la PTAR

Descripción	Total de PTAR: 116	100%
PTAR con macrofitas y maleza	17	14,7%
PTAR sin macrofitas ni maleza	75	64,7%
PTAR sin información de su estado	24	20,7%

Fuente: Información recopilada por la SUNASS de las EPS en el 2008.

En lo que concierne a Piura, el porcentaje de tratamiento de aguas por la EPS Grau, catalogada como EPS Grande, es de 44,33% (16'046,364 m³)⁴³ del total 36'196,186 m³ volcado a la red, esta cifra supone un descenso del 48,97% (2010) y 50,86% (2009)¹². Es importante insistir entre “tratamiento” y “bondad de tratamiento”, de este último la información es muy escasa.

Existen, en la Región Piura un total de 143,827¹³ conexiones de alcantarillado, se encuentran activadas el 84%; de este total el 94,6% pertenece a la categoría doméstica, 4,4% a la categoría comercial, 0,6% a la categoría estatal, 0,2% categoría social y 0,2% categoría industrial. La red de colectores secundarios, por su antigüedad, presenta desgaste en las paredes debido a efectos abrasivos por arena presente en el agua, lo cual disminuye

¹⁰ Información recopilada por la SUNAAS de las EPS en Agosto de 2008.

¹¹ *Ibidem*.

¹² Vergara, A. Las EPS y su desarrollo 2012. Gerencia de supervisión y fiscalización. Julio, 2012. (INFORME)

¹³ Dato a fines del 2011.

su capacidad hidráulica, y también existen problemas de bajos caudales en algunos conectores, los cuales provocan acumulación de sedimentos en el fondo¹⁴.

2.1.2. Tratamiento de las aguas residuales en América

En América hay una asociación que se encarga de regular el agua potable y saneamiento, mediante un acuerdo que se realizó en Octubre del año 2001. Son 8 países que se unieron para realizar un intercambio continental. A la fecha se han sumado 8 países más, esta asociación se llama ADERASA¹⁵.

Las empresas prestadoras que se han comparado, de América, son aquellas que son las llamadas EPS Grandes (Tabla 7):

Tabla 7: EPS que conforman la ADERASA

EPS	País	EPS	País
Mendoza	Argentina	Cali	Colombia
Salta	Argentina	Cartago	Colombia
COMPESA	Brazil	Bogotá	Colombia
EPSEL S.A.	Perú	Medellín	Colombia
OSE	Uruguay	Pereira	Colombia
SEDALIB S.A.	Perú	Ibague	Colombia
EPS GRAU S.A.	Perú	Cucuta	Colombia
INTERAGUA	Ecuador	Barranquilla	Colombia
SEDAPAL S.A.	Perú	Acuavalle	Colombia
SEDAPAR S.A.	Perú	Empocaldas	Colombia
AyA	Costa Rica	Cartagena	Colombia
AySA	Argentina	Conhydra	Colombia
Ag. De Santa Fe	Argentina	IDAAN	Panamá
EPMAPS Q	Ecuador	CAGECE	Brazil
ESSAP	Paraguay	SANETIMS	Brazil
Mar del Plata	Argentina	San Pedro Sula	Honduras
COPASA	Brazil		

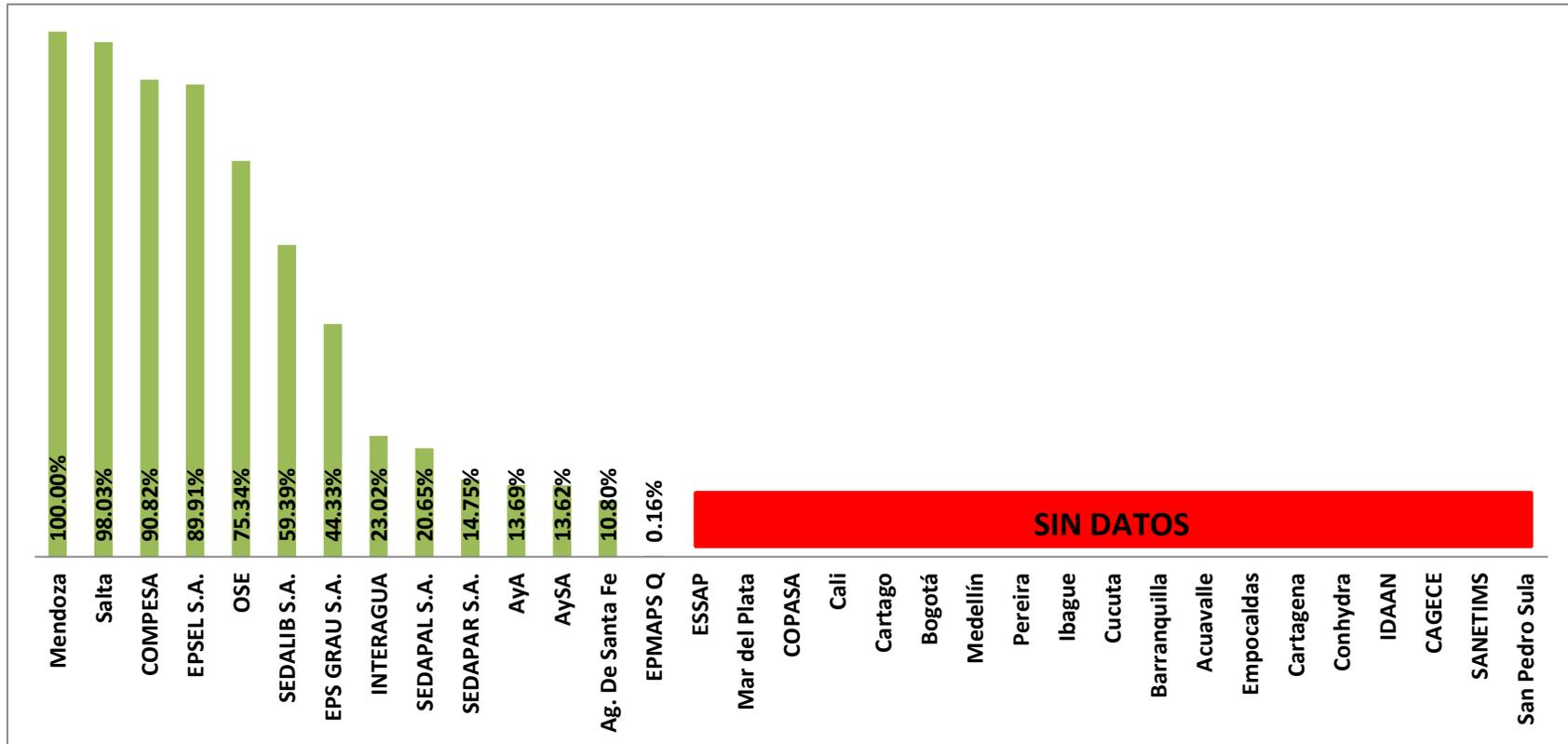
En Chile es posible reconocer la influencia de la influencia inglesa, tanto en la estructura como en su marco regulatorio. La influencia francesa se observa en Colombia, Guatemala, Honduras, México y Perú, que optaron por el manejo descentralizado a nivel municipal, y han intentado introducir competencia y atraer participación del sector privado mediante procesos de licitación y contratos de concesión¹⁶. En dicha asociación se han realizado innumerables comparaciones entre las diferentes EPS (Tabla 8, Tabla 15 y Tabla 10):

¹⁴ SUNASS. Determinación de la fórmula tarifaria, estructura tarifaria y metas de gestión aplicable a la entidad prestadora de servicios de saneamiento Grau S.A. Lima, Diciembre 2011.

¹⁵ Asociación de Entes Reguladores de Agua Potable y Saneamiento de las Américas.

¹⁶ Vergès, J-F. Servicio de agua potable y alcantarillado: lecciones de las experiencias de Alemania, Francia e Inglaterra. Santiago de Chile, 2010.

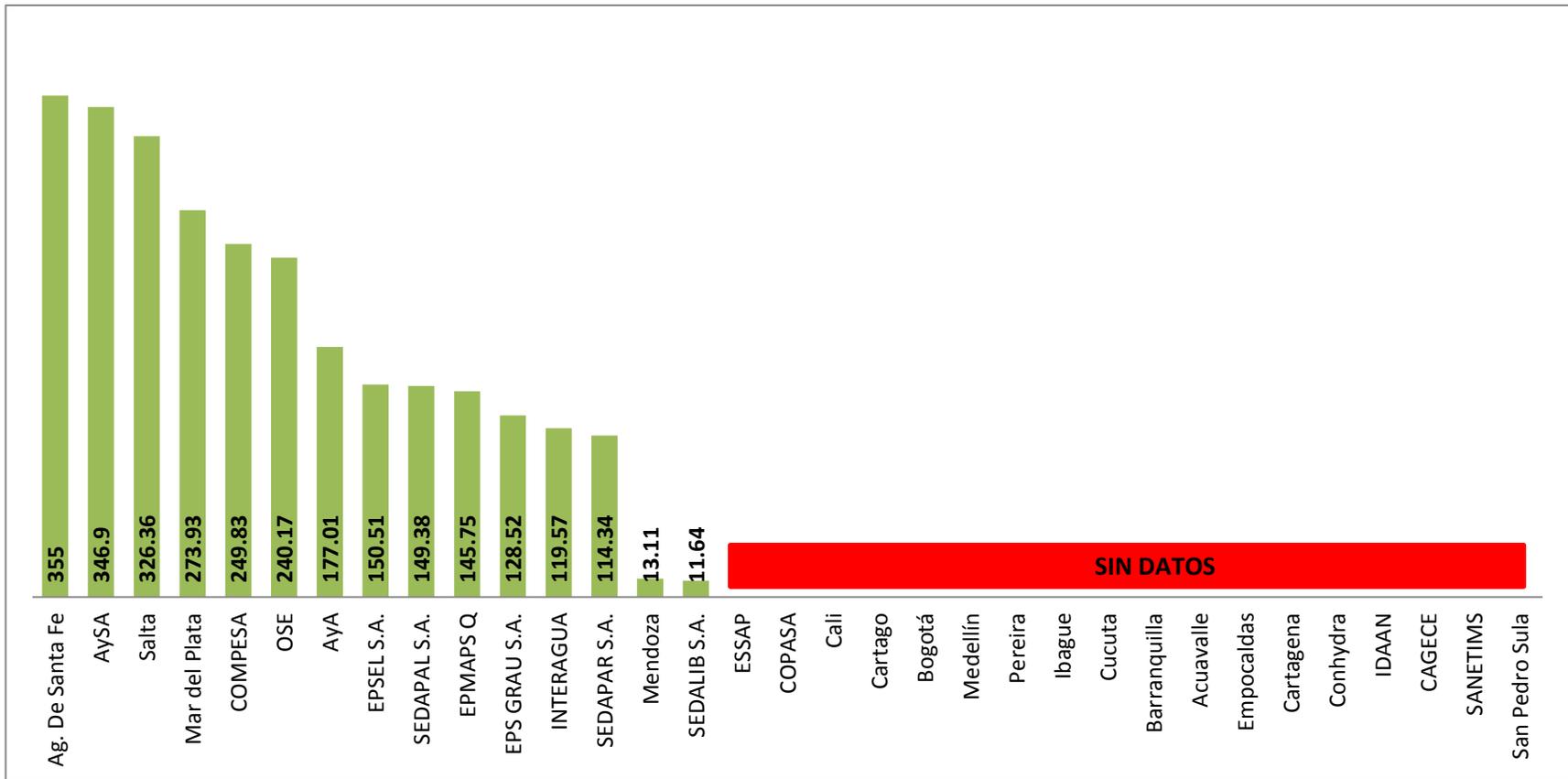
Tabla 8: Incidencia del Tratamiento de AR en la ADERASA¹⁷



Objetivo de la Tabla 8, es medir el grado de agresión al medioambiente de las aguas servidas recogidas.

¹⁷ Grupo regional de trabajo de benchmarking. Informe Actual 2012. Datos hasta el 2011.

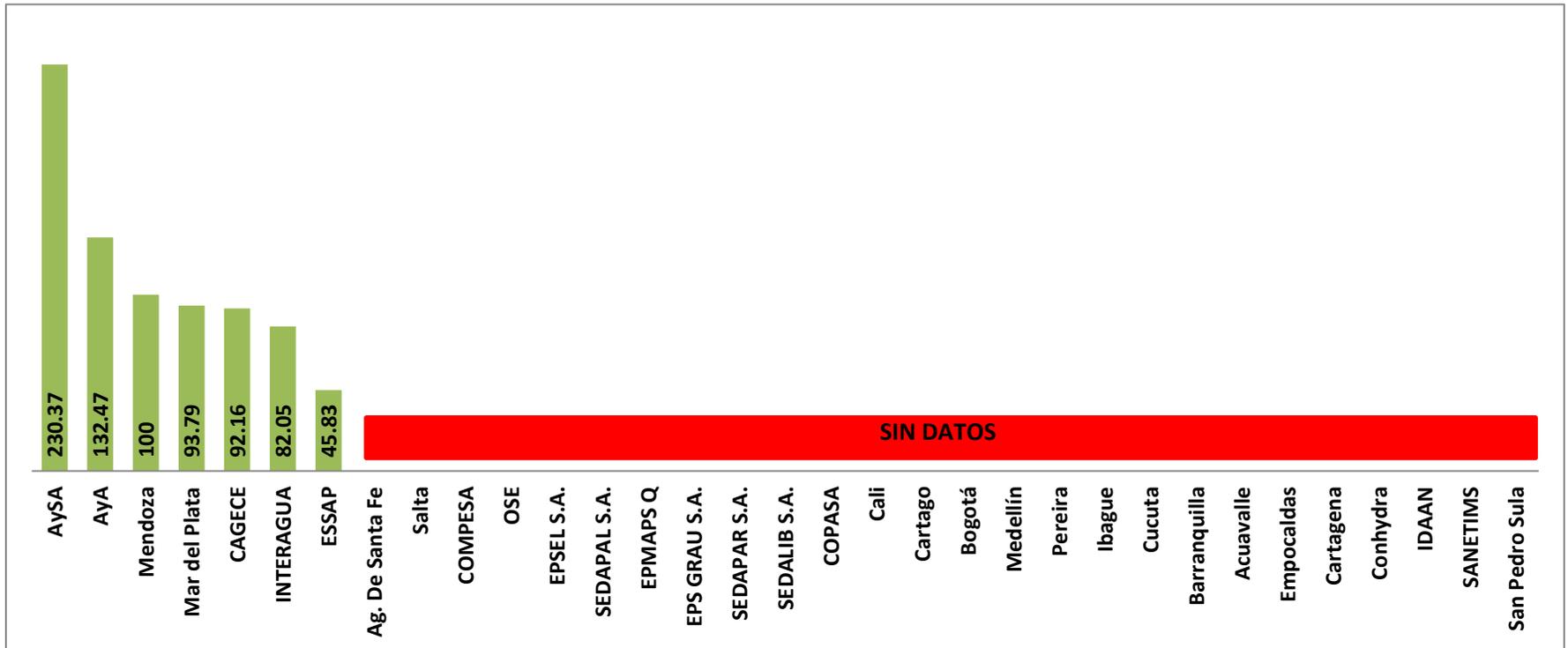
Tabla 9: Caudal diario de AR (l/hab/día)



Objetivo de la Tabla 15, medir la cantidad de líquido volcado y su relación con la distribución de agua potable. Permite dar una idea del impacto ambiental del sistema de alcantarillado y, al compararlo con el consumo de agua potable, da una idea de la infiltración de aguas parásitas en las redes de alcantarillado¹⁸. Pueden ser provenientes de los acuíferos o de la permeabilidad del suelo, en caso de lluvias.

¹⁸ Grupo regional de trabajo de benchmarking. Informe Actual 2012. Datos hasta el 2011.

Tabla 10: Ejecución de análisis de aguas servidas en la ADERASA



Objetivo de la

Tabla 10 analizar el cumplimiento de la normativa vigente en cuanto al control de la calidad de los líquidos volcados al sistema. Este indicador está directamente relacionado con el impacto ambiental de la operación del servicio de alcantarillado sanitario y es de suma importancia conocerlo y seguir su evolución.¹⁹

¹⁹ Grupo regional de trabajo de benchmarking. Informe Actual 2012. Datos hasta el 2011.

2.1.3. Tratamiento de las aguas residuales en la Unión Europea

Existen todavía grandes diferencias en la situación del tratamiento de las aguas residuales entre el norte y el sur de Europa. La mayor parte de la población de los países del norte se encuentra conectada a plantas de tratamiento terciario, en las cuales se retira eficientemente la materia orgánica y los nutrientes vertidos. En los países del centro de la Unión Europea (Dinamarca, Países Bajos, Alemania o Austria) más de las dos terceras partes de la población están conectadas a tratamiento de tipo terciario²⁰.

La Directiva 91/271/CEE del 21 de Mayo de 1991, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas, define las normas comunes de la Unión Europea en lo que se refiere a recolección, tratamiento y vertido de estas aguas, así como al tratamiento y vertido de las mismas en algunos sectores industriales. Esencialmente, establece un calendario que los países miembros deben respetar para equipar las aglomeraciones urbanas con sistemas colectores y de tratamiento (primario, secundario o adecuado) de las aguas residuales.

Según la Unión Europea, los países que se rigen fuertemente a las normas establecidas para el tratamiento y vertido de aguas residuales son Alemania, Inglaterra y Francia. Alemania, ha implementado normas de tratamiento de las aguas residuales más rigurosas que las definidas en la directiva. Casi todos los hogares de Alemania e Inglaterra están conectados a redes de alcantarillado, por el contrario Francia aún hace uso de fosas sépticas.

Se sabe que Francia está bajo amenazas de fallos adversos del tribunal de justicia de la UE. Una de las mayores diferencias es que, Alemania tiene mayor cantidad de tratamientos terciarios, a comparación de Francia e Inglaterra.

2.1.4. Tratamiento de las aguas residuales en Inglaterra y Gales

La empresa que regula los sistemas de agua potable y aguas residuales es OFWAT²¹, que está compuesta por diez EPS. La calidad del agua es regulada por el Drinking Water Inspectorate (DWI) y los vertimientos por la Environmental Agency (EA).

La DBO tiene que ser menor de 20 mg/L y los sólidos suspendidos menores que 30 mg/L. Esta recomendación se originó en la Comisión de la Corona para disposición de Aguas Residuales, en 1912, la cual consideraba que con un factor mínimo de dilución de 8, las aguas superficiales tendrían un DBO menor de 4 mg/L y se evitarían problemas de polución²².

²⁰ Fernández, J. Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Madrid, 2010.

²¹ OFWAT: Office Water

²² Romero, J. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. 3a ed. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.

2.1.5. Tratamiento de las aguas residuales en Estados Unidos

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) presenta los siguientes criterios para efluentes secundarios (Tabla 11). Los “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*” (Estándares de métodos para la examinación de aguas y aguas residuales)²³, constituye un compendio de métodos analíticos que se siguen en Estados Unidos y Canadá para evaluar la calidad del agua. El uso de agua municipal y flujo de aguas residuales resultantes varían desde 280 LPD²⁴ en el caso de municipios residenciales pequeños hasta más de 900 LPD en las grandes ciudades industrializadas²⁵, estos promedios diarios se basan en cantidades anuales. La calidad de aguas residuales municipales varía con la proporción de contribuyentes residenciales, comerciales e industriales.

Tabla 11: Criterio para efluentes secundarios en EEUU²⁶

Parámetro	Unidad	Promedio mensual	Promedio semanal	Referencia
DBO ₅	mg/L	30*	45	28
Sólidos suspendidos	mg/L	30*	45	28
pH	unidad	6 – 9	6 - 9	28
DBO ₅	mg/L	25*	40	28
Coliformes fecales	100 mL	200		27

*La remoción promedio debe ser mayor del 85%

2.2. Generalidades del tratamiento de AR

La capacidad y eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales las determina su diseño²⁷. Una vez conocida la naturaleza del problema, las características del agua residual y la modificación producida en las operaciones y procesos unitarios, se estará en disposición de seleccionar los métodos que se ajusten más a su proyecto²⁸.

El objetivo del tratamiento de las aguas residuales es mejorar su calidad para cumplir con las normas de calidad del cuerpo receptor o las normas de reutilización. Se necesita haber realizado el estudio del cuerpo receptor, y se deberá tener en cuenta las condiciones más desfavorables, el grado de tratamiento se determinará de acuerdo con las normas de calidad del cuerpo receptor²⁹.

Si se quiere aprovechar los efluentes de PTAR, el grado de tratamiento se determinará de conformidad con los requisitos de calidad para cada tipo de aprovechamiento. Una vez

²³ APHA et al., 1992

²⁴ Litros per cápita por día.

²⁵ Glynn, J. & Heinke, G. Ingeniería Ambiental. 2^a ed. México, 1999.

²⁶ Romero, J. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. 3a ed. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.

²⁷ Ibídem.

²⁸ Metcalf, E. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. 1era ed., 1977.

²⁹ Norma OS.090. Artículo 4.1 y 4.2

determinado el grado de tratamiento el diseño debe efectuarse de acuerdo con las siguientes etapas³⁰:

- Caracterización de aguas residuales domésticas e industriales;
- Información básica (geológica, geotécnica, hidrológica y topográfica);
- Determinación de los caudales actuales y futuros;
- Aportes per cápita (Tabla 12) actuales y futuros;
- Selección de los procesos de tratamiento;
- Predimensionamiento de alternativas de tratamiento;
- Evaluación de impacto ambiental y de vulnerabilidad ante desastres;
- Factibilidad técnico-económica de las alternativas y selección de la más favorable.

Tabla 12: Aporte per cápita para aguas residuales domésticas

Parámetro	Unidad	Cantidad
DBO₅ días a 20°C	g/ (hab.d)	50
Sólidos en suspensión	g/ (hab.d)	90
NH₃ – N como N	g/ (hab.d)	8
N Kjeldahl total como N	g/ (hab.d)	12
Fósforo total	g/ (hab.d)	3
Coliformes fecales	Nº bacterias / (hab.d)	2E+11
Salmonella Sp.	Nº bacterias / (hab.d)	1E+08
Nematodes intes.	Nº bacterias / (hab.d)	4E+05

Cuando se quiere optar por un sistema de tratamiento de aguas residuales se debe tener en cuenta lo siguiente³¹:

- Identificar las exigencias de calidad del agua a tratar para su disposición en un cuerpo receptor o con fines de reuso, de manera coherente con la realidad local actual y proyectada.
- Buscar las mejores posibilidades del reuso de las aguas tratadas, para obtener el mayor beneficio social (salud pública), ambiental (gestión ambiental de los recursos hídricos) y económico.
- Incluir dentro de los costos de inversión, operación y mantenimiento, un presupuesto para la intervención social y los análisis del agua necesarios para la evaluación y monitoreo del sistema de tratamiento.
- Contar con la información básica para elaborar el estudio definitivo y el expediente técnico, cuyo contenido y especificaciones se encuentran regulados en sus aspectos técnicos y de parámetros de calidad del agua.
- Planificar la disponibilidad del área, conseguir la aceptación de la población (la cual debe ser capacitada y sensibilizada), y, por último, lograr el compromiso y organización de la sociedad civil y sus autoridades.
- Conocer la normatividad legal y técnica sobre las PTAR. Se deberá considerar también la calidad del efluente, para los fines de aprovechamiento deseado.

³⁰ Norma OS.090. Artículo 4.2.3.1

³¹ Ministerio del Ambiente. Manual para municipios ecoeficientes. Lima, Diciembre 2009.

- Ser eficiente en la remoción de patógenos y ajustarse a los parámetros convencionales de los procesos más empleados.
- Contar con personal responsable del mantenimiento y operación de la planta, debidamente capacitado y sensibilizado.

Para el diseño de la planta se requiere³²:

- Estudios adicionales de caracterización que sean requeridos;
- Estudios geológicos, geotécnicos y topográficos al detalle;
- Estudios de tratabilidad de las aguas residuales, con el uso de plantas a escala de laboratorio o piloto, cuando el caso lo amerite;
- Dimensionamiento de los procesos de tratamiento de la planta;
- Diseño hidráulico sanitario;
- Diseño estructural, mecánicos, eléctricos y arquitectónicos;
- Planos y memoria técnica del proyecto;
- Presupuesto referencial y fórmula de reajuste de precios;
- Especificaciones técnicas para la construcción y
- Manual de operación y mantenimiento.

³² Norma OS.090. Artículo 4.2.3.2

En la Tabla 13, se encuentra especificada la remoción esperada de materia orgánica, sólidos en suspensión y microorganismos patógenos, según tipo de procesos de tratamiento de AR.

Tabla 13: Remoción esperada de materia orgánica, sólidos en suspensión y microorganismos patógenos, según tipo de procesos de tratamientos de AR

Procesos de tratamiento	Remoción (%)		Remoción (ciclos log ₁₀) [*]		
	DBO	Sólidos en suspensión	Bacterias	Helmintos	Quistes
Sedimentación primaria	25 - 30	40 - 70	0 - 1	0 - 1	0 - 1
Lodos activados ³³	70 - 95	70 - 95	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Filtros percoladores ⁶⁵	50 - 90	70 - 90	0 - 2	0 - 1	1 - 2
Lagunas aireadas ³⁴	80 - 90	**	1 - 2	0 - 1	0 - 1
Zanjas de oxidación ³⁵	70 - 95	80 - 95	1 - 2	0 - 1	-
Lagunas de estabilización ³⁶	70 - 85	**	1 - 6	1 - 4	2 - 4

Fuente: Norma OS.090. Artículo 4.3.13.

*1 ciclo de log₁₀: 90% de remoción; 2 ciclos= 99%; 3 ciclos= 99.9%; etc.

**Dependiente del tipo de lagunas.

2.3. Tipos de tratamiento de AR

2.3.1. Pretratamiento o tratamiento preliminar

Se refiere a instalaciones que permiten el acondicionamiento del agua, cuyo fin es retener sólidos gruesos, plásticos, material flotante, grasas y material rápidamente sedimentable (gravas y arenas). No se consideran como unidades de tratamiento propiamente, ya que las operaciones que se realizan reducen escasamente la materia orgánica soluble³⁷.

En el pretratamiento se eliminan materias cuya presencia en el efluente perturbaría el tratamiento total y el funcionamiento eficiente de las máquinas, equipos e instalaciones de la estación depuradora³⁸. Comprende de dos fases.

2.3.1.1. Desbaste

Su objetivo es retener y separar los cuerpos voluminosos y flotantes. El desbaste previo es la obra que se realiza para eliminar del agua los elementos que por su volumen son arrastrados por el agua residual, su ubicación tiene que ser en la entrada de los colectores³⁹.

³³ Precedidos de tratamiento primario y seguidos de sedimentación secundaria.

³⁴ Incluye laguna secundaria.

³⁵ Seguidas de sedimentación.

³⁶ Dependiendo del número de lagunas y otros factores como: temperatura, periodo de retención y forma de las lagunas.

³⁷ MINAM, Decretos supremos. 2009.

³⁸ Fernández, J. Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Madrid, 2010.

³⁹ *Ibidem*.

El dimensionamiento es función de la experiencia sobre lo que arrastre ese colector. La velocidad de sedimentación es la relación entre el caudal (m^3/h) y la superficie del pozo (m^2).

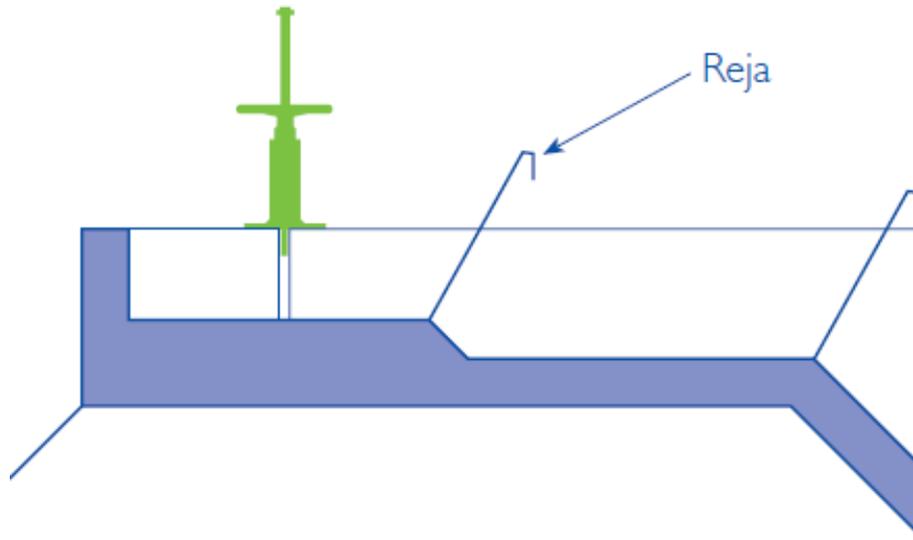


Imagen 1: Reja recta sobre solera en cascada para compensar la pérdida de carga.

Fuente: Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación.

Las rejas se dividen en dos grupos según el tipo de material que se separen: gruesos y finos. Pueden ser rectas o curvas y por su forma de limpieza pueden ser manuales o automáticas, según sea la acción del peine: frontal o dorsal. Las rejas de gruesos tienen una separación libre entre barras de 5 y 10 cm. A esta separación se le llama luz. Las rejas para los finos tienen función complementaria, con luces libres entre 2 y 5 cm⁴⁰.

Las bombas dilaceradoras actúan triturando los materiales, suelen ir después del pozo de gruesos y sustituyen a las rejas de gruesos y finos. Reduce el tamaño de los sólidos⁴¹.

2.3.1.2. Desarenadores

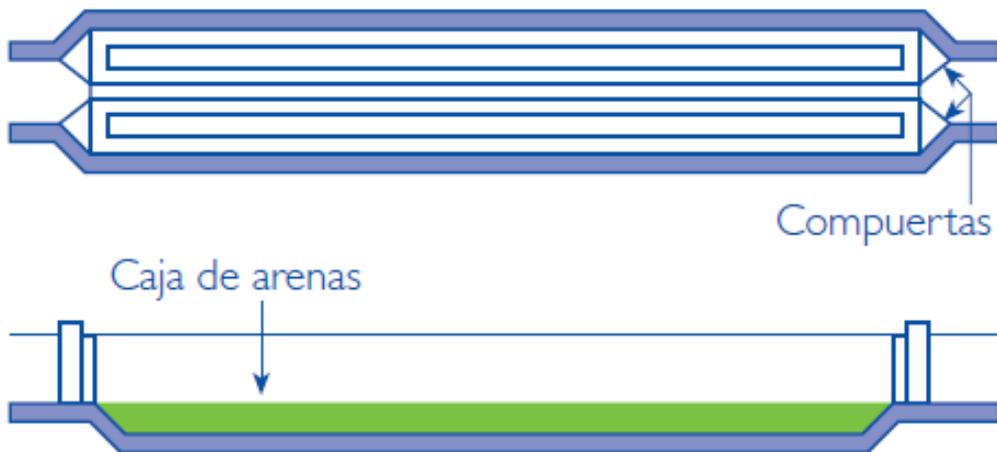
Son dispositivos de remoción de arena que evitan su decantación posterior de arena en las lagunas primarias cerca de la entrada. Cuando los sistemas son grandes ($>110 \text{ L/s}$) o cuando el agua residual contiene una gran cantidad de arena, los desarenadores resultan imprescindibles. El material recogido por los desarenadores se caracteriza por ser teóricamente inorgánico y tener una velocidad de sedimentación mayor que el correspondiente a la materia orgánica biodegradable⁴². La Imagen 2 muestra en planta y perfil un desarenador longitudinal o de canal, que suele tener compuertas de entrada y salida.

⁴⁰ Fernández, J. Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Madrid, 2010.

⁴¹ Chávez de Alláin, A. Curso: Tratamiento de Aguas Residuales. Piura, Septiembre 2010.

⁴² Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México, 2007.

Imagen 2: Desarenador longitudinal o de canal.



Fuente: Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación.

El objetivo principal del desarenador es retirar las arenas hasta un tamaño de 200 micras, hay varias técnicas de desarenado⁴³:

- Desarenador en canal (aireados o no).
- Desarenador de flujo tangencial.
- Desarenador rectangular aireado.

2.3.2. Tratamiento primario

Se conoce así al tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico o físico-químico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO₅ de las aguas residuales que entren, se reduzca, por lo menos, en un 20% antes del vertido, y el total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada se reduzca, por lo menos, en un 50%⁴⁴.

2.3.2.1. Decantación primaria⁴⁵

Es necesario eliminar la mayor cantidad de sólidos sedimentables, bajo la acción exclusiva de la gravedad. La retirada de los sólidos es muy importante ya que, pueden originar fuertes demandas de oxígeno en el resto de las etapas de tratamiento de la estación.

⁴³ Fernández, J. Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Madrid, 2010.

⁴⁴ Norma OS 090.

⁴⁵ Secretariado Alianza por el Agua. Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Centro de las nuevas tecnologías del agua. España, 2008.

2.3.2.2. Tratamientos físico-químicos⁴⁶

Mediante la adición de reactivos químicos, se consigue incrementar la reducción de los sólidos en suspensión, sólidos coloidales. Este tipo de tratamiento se utiliza fundamentalmente:

- Eliminar en las aguas residuales presentan vertidos industriales que pueden afectar negativamente al tratamiento biológico.
- Para evitar sobrecargas en el posterior tratamiento biológico.
- Contrarrestar las fuertes variaciones estacionales de caudal.
- Reducir el contenido de fósforo.

La influencia de la temperatura afecta al momento que aumenta la temperatura del agua, ya que aumenta la velocidad de sedimentación de las partículas. Las moléculas del agua reaccionan a los cambios de temperatura, aglutinándose cuando la temperatura del líquido es más baja, aumentando la densidad. El agua debe estar en el decantador el tiempo suficiente para que decante. El caudal varía mucho entre el día y la noche, y el tiempo de retención se calcula para un caudal específico⁴⁷.

Estos tratamientos pueden ser:

- Tanques sépticos
- Tanques Imhoff
- Zanjas de infiltración

2.3.3. Tratamiento secundario

Está constituido por procesos biológicos con sedimentación secundaria u otros de proceso. El afluente del tratamiento secundario debe haber reducido su DBO inicial a un 70-90% y los sólidos totales en un 90%. El tratamiento biológico se realiza con la ayuda de microorganismos (bacterias) que en condiciones aerobias actúan sobre la materia orgánica. La eliminación de aquellos sólidos en suspensión que por su tamaño o baja densidad no han sedimentado en los tratamientos anteriores, debe realizarse por medios biológicos, ya que el eliminarlos por medios físico-químicos resultaría complicado⁴⁸.

Los diferentes tipos de tratamientos que existen:

- Filtro percolador.
- Filtro percolador con filtro de macrofitas.
- Humedales artificiales.
- Lagunas de estabilización.
- Lagunas aireadas.
- Lodos activados por aireación.
- Reactor anaeróbico de flujo ascendente.

⁴⁶ *Ibidem*.

⁴⁷ Fernández, J. Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Madrid, 2010.

⁴⁸ Usero, F. Evaluación de emisores de riego localizado de bajo caudal en condiciones de invernadero y aguas residuales urbanas regeneradas. Almería, Setiembre 2011.

Los tratamientos biológicos simulan a los procesos naturales de descomposición de residuos y depuración de aguas, son procesos en los que se mantiene una población estable de microorganismos capaces de nutrirse de la materia orgánica presente en el agua, transformándola en CO₂ y otros compuestos estables que son separados posteriormente del agua por decantación⁴⁹.

Esta digestión biológica puede llevarse a cabo en condiciones aerobias o anaerobias, según sea la naturaleza de los microorganismos implicados en el proceso, y en diversos sistemas: lagunas naturales o aireadas, lechos bacterianos, sistemas de fangos activados, etc. La elección de un sistema u otro viene dada por el caudal de agua a tratar, o, el número de habitantes de la población y superficie requerida⁷⁹.

2.3.4. Tratamiento terciario

La necesidad de implementar un tratamiento terciario depende de la disposición final que se pretenda dar a las aguas residuales tratadas, tiene como objetivo lograr fundamentalmente la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo⁵⁰.

Solo se utiliza en situaciones de rigor, donde se requiere elevada calidad del efluente de salida ya que los costos son muy altos. Algunos de los procesos que se incluyen en este tipo de tratamiento son⁷⁹:

- Nitrificación/des-nitrificación (para la eliminación del nitrógeno).
- Precipitación del fósforo.
- Osmosis inversa.
- Destilación para eliminación de sólidos disueltos.
- Procesos de filtración.
- Destilación, etc.

El efluente del tratamiento terciario también puede tener algunos usos especiales, como la recarga de acuíferos, uso industrial, etc.⁵¹

2.3.5. Otros procesos

Existen otro tipo de procesos que están relacionados con los sistemas de tratamiento de aguas residuales, que se emplean también con la finalidad de reducir el contenido de bacterias y virus presentes. Los tres principales métodos de desinfección en aguas residuales son⁸²:

- Cloración: se debe indicar, aunque es muy utilizado por los municipios, que la materia orgánica remanente, oxida el cloro reduciendo su acción desinfectante y

⁴⁹ Hernández, A. 1990. Depuración de aguas residuales. Paraninfo. Madrid.

⁵⁰ MINAM, Decretos supremos. 2009.

⁵¹ Ibídem.

permite la formación de compuestos químicos órgano-clorados que pueden causar problemas a la salud pública y pueden quedarse en el medio ambiente.

- Sistemas de desinfección por ozono: mediante la creación de una descarga eléctrica en corona, similar a los relámpagos y rayos durante tormentas eléctricas, el ozono se mezcla con agua para lograr la desinfección deseada.
- Desinfección UV: durante el proceso, los patógenos no son destruidos sino que más bien pierden su capacidad de reproducción.

Capítulo 3

Lagunas de Estabilización en la Universidad de Piura

En 1985 se construyeron las lagunas de estabilización en la Universidad de Piura (UDEP), esta obra debía tratar las aguas residuales de la UDEP y tres urbanizaciones más. Dicho proyecto constaba de la construcción de dos series de lagunas primaria y secundaria en paralelo¹. Solo se llegó a construir una de las dos series que se diseñaron. Estas lagunas tienen un área aproximada de 3,5 ha, dentro de la Universidad consta, pues, de una laguna primaria y una secundaria.

El sistema está limitado por un cerco vivo-cortina natural- rompevientos con una población de *tamarix gallica* que se encuentra en el perímetro del sistema. Esta cortina, elimina problemas de olor y viento de manera que se constituye en una trampa para arena eólica y evita el oleaje del espejo de agua que podría ocasionar erosión en el talud. Su ubicación es estratégica, ya que el viento tiene una dirección preferencial de alisio (de sur-oeste a nor-este), dirección opuesta a los edificios que se encuentran dentro de la UDEP².

En el diseño de las lagunas, se consideró un caudal promedio de 12,84 L/s de aguas residuales domésticas provenientes de la Universidad y tres urbanizaciones de los alrededores:

- La Lagunas del Chipe.
- Los Cocos del Chipe.
- Fonavi (Residencial Vicús).

¹ Silva, J. Evaluación y diseño del sistema de lagunas de estabilización de la UDEP. Tesis Universidad de Piura, 1994.

² Benavent, 2013. Comunicación oral.

1.1. Lagunas de Estabilización

Conocidas también como lagunas de oxidación, la clasificación de estas lagunas depende de diversos factores como: tiempo de retención, carga orgánica por unidad de área, proceso de estabilización (aerobio, anaerobio o facultativo), profundidad de la laguna, etc.³

Según Sáenz⁴, es una estructura simple para embalsar agua, de poca profundidad (1 a 4 m), y tiempo de retención variable (1 a 40 días). Cuando las aguas residuales son descargadas en lagunas de estabilización, se realiza en las mismas un proceso llamado autodepuración o estabilización natural, donde ocurren fenómenos de tipo físico, químico y biológico (Silva, 2004)⁵.

Sus objetivos principales son⁶:

- Remover de las aguas residuales la materia orgánica que ocasiona la contaminación.
- Eliminar microorganismos patógenos que representan un grave peligro para la salud.
- Utilizar el efluente para reutilización con diferentes finalidades, dependiendo de la posición de los mismos (agricultura, recarga de acuíferos).

1.1.1. Lagunas aeróbicas

Son lagunas poco profundas (1 a 1,5 m), y suelen tener tiempo de resistencia elevada (20 – 30 días). El grupo específico de algas, animales o especies bacterianas presentes depende de los factores tales como la carga orgánica, el grado de mezcla de la laguna, el pH de los nutrientes, la luz solar y la temperatura. Pueden ser⁸⁶:

- Aerobias: con aireación natural, siendo el oxígeno suministrado por intercambio, a través de la interface aire-agua y fundamentalmente por la actividad fotosintética de las algas.
- Aireadas: en ellas la cantidad de oxígeno suministrada por medios naturales es insuficiente para llevar a cabo la oxidación de la materia orgánica, necesitándose un suministro adicional de oxígeno por medios mecánicos.

³ Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Ciencias Químicas. Lagunas de Estabilización. WWW Curso de Aguas Residuales (nd). Recuperado, 10 de Marzo de 2013.
<http://www.oocities.org/edrochac/residuales/lagunas7.pdf>

⁴ Sáenz, R. “Lagunas de estabilización y otros sistemas simplificados para el tratamiento de aguas residuales”. Manual DTIAPA N° C-14, CEPIS. Segunda edición. 1985.

⁵ Silva, J. Evaluación y diseño del sistema de lagunas de estabilización de la UDEP. Tesis Universidad de Piura, 1994.

⁶ Rodríguez, J. 2012. Extraído de internet.

<http://www.chduero.es/descarga.aspx?fich=/Publicaciones/guiapractica-depuracionaguas-chd.pdf>.

1.1.2. Lagunas anaeróbicas

Cuando la carga orgánica aumenta, la DBO excede la producción de oxígeno de las algas y las lagunas se tornan anaeróbicas. Según Sáenz⁸⁶, los mecanismos de la descomposición anaeróbica son sumamente complejos y aún no están completamente aclarados. En el proceso anaeróbico las bacterias suelen aprovechar parte de los nutrientes inorgánicos en la fabricación de su propio protoplasma celular, lo que también puede suceder en el proceso aeróbico.

Tienen una profundidad de 2-5m y reciben cargas orgánicas volumétricas mayores a 100 g de DBO₅/m³ día. Estas altas cargas orgánicas producen condiciones anaerobias estrictas (OD ausente) en todo el volumen de la laguna. Las lagunas anaerobias trabajan como tanques sépticos abiertos y trabajan bien en climas calientes. Pueden alcanzar remociones de hasta el 60%, a temperaturas de 20°C. Si la laguna está bien diseñada no tendrá problemas de olores. Tiene diferentes etapas de tratamiento:

- Hidrólisis: los compuestos orgánicos complejos e insolubles en otros compuestos más sencillos y solubles en agua.
- Formación de ácidos: los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos, produciéndose su conversión en ácidos orgánicos volátiles.
- Formación de metano: una vez que se han formado los ácidos orgánicos, una nueva categoría de bacterias actúa y los utiliza para convertirlos finalmente en metano y dióxido de carbono

1.1.3. Lagunas facultativas

Son aquellas que tienen una zona aerobia y otra anaerobia (superficie y fondo, respectivamente). La finalidad de estas lagunas es la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado proporcionando principalmente por las algas presentes⁷.

Según Sáenz⁸, cuando la carga orgánica aplicada a las lagunas es baja (entre 50 y 350 kg DBO₅/Ha/día, a alturas moderadas y temperaturas entre 10 y 30°C), el estrato superior de las lagunas se llena de algas microscópicas que, en presencia de la luz solar producen grandes cantidades de oxígeno, haciendo que el agua llegue a estar sobresaturada de OD. El estrato inferior de estas lagunas suele estar en condiciones anaeróbicas debido a que la penetración de la luz solar es limitada, 5 a 15 cm.

⁷ Rodríguez, J. 2012. Extraído de internet.

<http://www.chduero.es/descarga.aspx?fich=/Publicaciones/guiapractica-depuracionaguas-chd.pdf>.

⁸ Sáenz, R. "Lagunas de estabilización y otros sistemas simplificados para el tratamiento de aguas residuales". Manual DTIAPA N° C-14, CEPIS. Segunda edición. 1985.

1.2. Lagunas de Estabilización en la UDEP

La construcción y puesta en funcionamiento de las lagunas se realizó en forma gradual. En el mes de Julio de 1986 entró en operación la laguna primaria; en Enero de 1987, se empezó a derivar el efluente de la laguna primaria hacia la secundaria y en Febrero de 1988 se inició la etapa de reuso del efluente del sistema con fines de riego⁹.

La empresa a cargo del diseño y construcción de estas lagunas, Ejecutores S.A, analizó los consumos de agua, determinando el caudal promedio de consumo (Q_p), el caudal máximo diario (Q_{md}), y el caudal máximo horario (Q_{mh}), teniendo en consideración el Reglamento Nacional de Construcción. En la Tabla 1 se encuentran especificados los datos estimados del consumo de agua potable, de donde se considera que el 80% sería la contribución de las urbanizaciones a los desagües. Conociendo la zona, y sabiendo la exposición a lluvias periódicas y que el 100% de viviendas tiene sistema de recolección, se consideró un 10% adicional para determinar los caudales afluentes a las lagunas (Tabla 2)⁸⁸:

Tabla 1: Caudales de consumo según diseño de Ejecutores S.A.

Habilitaciones	Población (ha)	Consumo (l/ha/día)	Q_p (l/s)	Q_{md} (l/s)	Q_{mh} (l/s)
Vicús	2100	200	4,86	6,32	12,15
Los Cocos	1884	200	4,36	5,67	10,90
Lagunas	1338	200	3,10	4,03	7,74
UDEP	3000	40	1,39	1,81	3,47
TOTAL	8322	-	13,71	17,83	34,26

Tabla 2: Caudales de desagüe para el diseño de Ejecutores S.A.

Habilitaciones	Q_p (l/s)	Q_{md} (l/s)	Q_{mh} (l/s)
Vicús	4,38	5,69	10,94
Los Cocos	3,93	5,10	9,81
Lagunas	2,79	3,62	6,97
UDEP	1,25	1,63	3,13
TOTAL	12,34	16,04	30,84

Con los datos obtenidos se determinaron las características para las futuras lagunas, considerando una inclinación de taludes de las lagunas 1:3 (vertical: horizontal). El dimensionamiento de las lagunas es el siguiente¹⁰ (Tabla 3 y Tabla 4):

⁹ Silva, J. Evaluación y diseño del sistema de lagunas de estabilización de la UDEP. Tesis Universidad de Piura, 1994.

¹⁰ Benavent, 2013. Comunicación oral.

Tabla 3: Datos de las lagunas de estabilización

Laguna	Área (m ²)	EA ¹¹ (m ²)	VP ¹² (m ³)	P ¹³ (m)	AEA ¹⁴ (m)	E ¹⁵ (mg/l DBO ₅)
Anaerobia	74,80x72,60	69,35x67,15	9494	2,60	2,20	81,00
Facultativa	85,20x84,30	82,20x81,30	9975	2,00	1,65	16,20

Tabla 4: Carga orgánica (CO) de las lagunas

	CO*(mg DBO/l)	CO**(mg DBO/l)	CO***(mg DBO/l)
Entrada del sistema	222,4	353	333
Interconexión	58,4	122	--
Salida de riego	22,9	72,8	--

* Datos hasta el año 2004 (Silva¹⁶).

** Datos hasta Agosto del 2011 (PAMA¹⁷).

*** Datos del 21/05/2013 (Laboratorio de ingeniería sanitaria de IHSS), solo se determinaron los datos de la entrada del sistema ya que la laguna secundaria aún no se llena.

1.2.1. Descripción de la operación del sistema de tratamiento

El agua residual ingresa a la laguna primaria-nivel de operación 2,25m en promedio-, donde se produce la deposición de los sólidos sedimentables que ingresan junto con el agua formando un estrato en el fondo en el que predominan los procesos facultativos, basados en una combinación de procesos aerobios en la parte superficial y anaerobios en el fondo, donde se depositan los sedimentos¹⁸.

El efluente de la laguna primaria facultativa ingresa a la laguna secundaria-también facultativa- a través de la interconexión, trabaja a 1,65m de tirante promedio, tiene menor carga orgánica superficial, con la finalidad de permitir el desarrollo de una población de algas activa. Se caracteriza por tener una zona aerobia significativa en la zona superficial donde existe la simbiosis entre algas y bacterias, y una zona anaerobia en el fondo. Son dos mecanismos de adición de oxígeno que se producen en el estrato superior: la fotosíntesis realizada por las algas, y la aireación debida a la acción del viento en la superficie⁹⁸.

¹¹ Espejo de agua

¹² Volumen promedio de operación de agua

¹³ Profundidad

¹⁴ Altura del espejo de agua

¹⁵ Efluente

¹⁶ Silva, J. Evaluación y diseño del sistema de lagunas de estabilización de la UDEP. Tesis Universidad de Piura, 1994.

¹⁷ Universidad de Piura. Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de las lagunas de estabilización. Piura, Noviembre del 2011.

¹⁸ Ibídem

1.3. Investigaciones realizadas en las lagunas de estabilización

1.3.1. Investigación para la caracterización de la napa freática en relación con los efluentes

Para actualizar la calidad de la napa freática se instalaron de forma permanente un aproximado de 12 piezómetros.

1.3.2. Proyecto de reforestación

Este proyecto se realizó basado en el reuso del efluente tratado, proveniente de la laguna secundaria y mediante riego por gravedad. Esta área fue desarrollada con 449 plantas de tamarindo (*Tamarindus indica*), 585 algarrobos (*Prosopis sp.*) y 43 cocoteros (*Cocus nucifera*), está ubicada detrás de la cortina vegetal (*Tamarix gallica*) en dirección oeste y norte del sistema¹⁹.

La zona reforestada actualmente representa 11,6 ha reforestadas con el efluente de las lagunas de estabilización²⁰, que unidas a las del resto del campus constituyen, un pulmón verde importante para mantener una óptima calidad del aire en el Campus Universitario y alrededores, además regula la temperatura ambiental, reduce las concentraciones de uno de los principales gases de efecto invernadero, principal responsable del calentamiento global y cambios climáticos, el dióxido de carbono.

1.3.3. Molino de viento

Instalado en la laguna primaria, dentro del proyecto “Optimización de lagunas de estabilización mediante aireación artificial. Proyecto EPS Grau-UDEP”, que realizado en el período 1995-1996, con la finalidad de eliminar puntos muertos-o cortocircuitos-, derivados de la geometría de las lagunas. Con la ayuda de la energía eólica se succiona agua residual desde el punto más favorable en oxígeno de la laguna primaria para ser descargada en el punto menos favorable en oxígeno disuelto, lográndose elevar el nivel de oxígeno en las zonas de cortocircuito o de poca renovación de agua y de biomasa²¹, mejorando así las características del agua residual. Asimismo, se comprobó que la incorporación de aireación artificial en zonas con velocidades de viento superiores a los 7 km/h contribuiría a optimizar los diseños de lagunas de estabilización, reduciendo el área de espejo de agua y el consecuente requerimiento de terreno²².

¹⁹ Ibídem.

²⁰ Benavent, 2013. Comunicación oral.

²¹ Biomasa: Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. (04 Julio 2013. Extraído de RAE)

²² Universidad de Piura. Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de las lagunas de estabilización. Piura, Noviembre del 2011.

1.3.4. Humedal artificial de flujo vertical (HAFV)

Es un sistema piloto de tratamiento de aguas residuales. Fue instalado en el 2007, con el proyecto “Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales de flujo vertical”, se trató de una investigación conjunta con la Universidad de Ben Gurion de “El Negev”, Israel. El resultado de esta investigación auspiciado por AID (Alianza para el Desarrollo). El volumen de agua que fue tratada llegó a ser 2,5 m³/día-módulo y 10 horas de tratamiento¹⁰².

1.3.5. Monitoreo continuo mediante el uso de una balsa

La calidad del tratamiento del sistema de aguas residuales de la Universidad de Piura se monitorea una vez al mes utilizando una balsa construida para tal efecto, con todos los elementos necesarios para transportar y conservar las muestras.

1.4. Problemática de las lagunas de estabilización de la UDEP

El diseño de las lagunas se planteó para 25 años de uso, con un promedio de 12,84 L/s al final de este período. No obstante esa cantidad de bombeo no se llegó a alcanzar nunca; sin embargo la eficiencia en el tratamiento fue disminuyendo. Concurren dos circunstancias que deben señalarse: de un lado el bombeo fue aumentando por la entrada, sin control, de otras urbanizaciones al sistema y de otro, la sedimentación de lodos incrementada por la circunstancia anterior, que en poco tiempo disminuyó la capacidad de las lagunas, sobre todo de la primaria, produciendo un aumento de carga muy por encima de las posibilidades del sistema en la situación en que se encontraba. En el 2011 se procedió a solicitar a la empresa de agua potable la suspensión de bombeo, mientras se realizaban tareas de mantenimiento, ello obligó a la empresa a diseñar de urgencia un sistema de lagunas alternativo.

Adicionalmente, a la fecha de Noviembre del 2011, el sistema se sobrecargó con un volumen de sólidos sedimentados de 3049 m³. Esto quiere decir que el tiempo de retención real en la primera laguna real se redujo a 9 días, lo que justifica el no cumplimiento de la calidad del efluente del sistema en relación a la normativa vigente²³.

El funcionamiento de la laguna facultativa secundaria, tiene una fuerte acción fotosintética que se ve favorecida por la radiación solar, y contribuye a la reducción de la materia orgánica biodegradable, de los sólidos suspendidos totales y, en consecuencia, de los organismos coliformes²⁴.

El diseño original proyectó la ejecución de dos baterías de lagunas, y solo fue puesta en obra una de ellas, adicionalmente, se ha verificado la incorporación de seis (6)

²³ D.S N° 002-2008-MINAM, Categoría 3: Riego de vegetales de tallo alto y bajo

²⁴ Universidad de Piura. Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de las lagunas de estabilización. Piura, Noviembre del 2011.

urbanizaciones que no estuvieron previstas en el diseño del sistema. Lo que trae como consecuencia²⁵:

- La operación del sistema en condiciones de sobrecarga, lo cual se ha verificado con el cambio de coloración de la laguna secundaria de verdosa a rosácea (indicador de sobrecarga).
- La disminución del rendimiento del proceso de depuración de las aguas residuales y como consecuencia:
 - Efluente tratado con alto contenido de materia orgánica biodegradable-medida como DBO₅ y de coliformes totales y termotolerantes.
 - Riesgo de contaminación del suelo en el área de reuso.

Los impactos ambientales dieron lugar a una opción de mantenimiento drástica:

- Las lagunas fueron vaciadas. Ello fue posible gracias a la construcción de un nuevo sistema por la EPS Grau.
- Recojo del lodo y una disposición en un área segura. Ello le propicia una realización de compostación y la preparación del compost para utilizarlo en jardinería y forestación.
- Mantenimiento de las instalaciones de la laguna (ingreso, desbaste, desarenamiento, interconexión, etc.).

Al recuperar la capacidad del sistema de tratamiento, se recuperará también el tiempo de retención y con esto mejorará la calidad del efluente tratado y poder reutilizar el efluente con fines de reforestación, sin riesgo de producir contaminación de suelos, aguas, flora y la fauna del área de influencia del sistema.

La situación creada dio lugar a considerarse de carácter temporal, pues se hace necesario que el sistema de lagunas de estabilización de la Universidad de Piura, recupere su capacidad de tratamiento, por ello se procedió a solicitar la desconexión de las nueve (9) urbanizaciones que estaban conectadas al sistema, para que éste pueda servir a las necesidades actuales y futuras del Campus Universitario y los Colegios Vallesol y Turicará.

En la actualidad las lagunas se han limpiado de lodos y se está recuperando el bombeo que actualmente es de 7 L/s (considerando las 24 horas del día).

A la fecha, el sistema de lagunas de estabilización de la Universidad de Piura está llenando sus lagunas, y la EPS Grau, deriva también un caudal previsto para así poder tener resultados favorables, la laguna primaria está a punto de terminar su llenado.

²⁵ Universidad de Piura. Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de las lagunas de estabilización. Piura, Noviembre del 2011.

Capítulo 4

Sistemas blandos para el tratamiento de aguas residuales

Estos métodos suelen ser menos costosos y sofisticados que los convencionales en relación a la operación y mantenimiento. Aunque dichos procesos requieren mayores extensiones de terreno en comparación con los de tipo intensivo, suelen ser igualmente eficaces en la eliminación de materia orgánica e incluso más efectivos en la remoción de elementos patógenos y nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo; el consumo energético suele ser mínimo, los costos de mantenimiento más bajos y necesitan personal menos especializado¹.

Entre los sistemas blandos destacan los humedales artificiales, utilizados ampliamente en muchos países para el tratamiento de efluentes domésticos e industriales. En ellos las plantas son la base del proceso, ya que degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los elementos contaminantes. Adicionalmente, proporcionan una extensa superficie donde se posibilita el crecimiento bacteriano y se retienen los elementos sólidos en suspensión. Las plantas (macrofitas² acuáticas) se cultivan en lagunas, tanques o canales poco profundos por los que se hace circular el agua residual³.

Los humedales y las civilizaciones siempre han estado vinculados desde los inicios de la vida. Generalmente han sido vistos como tierras inservibles sujetas a ser drenadas o recuperadas; sin embargo, nos brindan múltiples servicios; uno de ellos, es la retención de nutrientes que se realiza en estos ecosistemas, y que los tipifica como uno de los ecosistemas más productivos de la biósfera⁴.

Lo propio del humedal es la vegetación acuática (macrofitas) perfectamente adaptada al medio en que viven. Naturalmente las macrofitas se suelen encontrar enraizadas en el terreno; no obstante las flotantes poseen un rendimiento en la filtración superior a las enraizadas. La transformación artificial de las macrofitas de enraizadas a flotantes, requiere

¹ Fernández et al. "Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación". Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

² Macrofita: Plantas acuáticas adaptadas a medios muy húmedo. Su adaptación al medio acuático es variable, pueden encontrarse en agua dulce, salada, etc. es decir se adaptan a muchos tipos de ambiente. (Plantas acuáticas, (2013, Julio 1). Recuperado 12:17, Julio 1, 2013, Wikipedia, Enciclopedia libre: http://es.wikipedia.org/wiki/Planta_acu%C3%A1tica)

³ *Ibidem*.

⁴ Fundación peruana para conservación de la naturaleza. Documento base para la elaboración de una estrategia de conservación de los humedales de la costa peruana. Lima, Setiembre 2010

de métodos específicos que combinen las ventajas de los sistemas flotantes con las de las macrofitas emergentes enraizadas de forma natural⁵.

4.1. Sistemas blandos

Según Muñoz⁶, los sistemas blandos de depuración son sistemas que tienen un consumo energético relativamente bajo, sobre todo si se comparan con los sistemas tradicionales de fangos activos. Algunos de estos sistemas están en desuso, otros se caracterizan por tener las bacterias fijas a un sustrato y se riega sobre ellas con agua residual, otros están basados en una decantación y digestión simultánea (sistemas mixtos) y otros tienen las bacterias en suspensión en el agua que se depura.

Un tipo muy interesante entre los sistemas blandos es el de los “fitosistemas⁷”, en los que se utiliza la energía solar a través del proceso fotosintético de los vegetales, tanto de algas como de vegetales superiores (macrofitas).

4.1.1. Tipos de sistemas blandos

Entre estos sistemas están los lagunajes (algas y bacterias suspendidas en el agua), los filtros verdes en base a especies herbáceas o leñosas, y los humedales artificiales⁸.

4.1.1.1. Lagunajes

Consiste en el vertimiento del agua residual sobre una serie de lagunas en las que se produce la depuración. Estas lagunas pueden ser de tres tipos o combinaciones entre ellos: anaerobias, facultativas y aerobias o de maduración (vid acápite **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

4.1.1.2. Filtros verdes

Consistentes en superficies de terreno con o sin vegetación, sobre las que se vierte el agua residual, actuando como principal elemento depurador el suelo y la rizosfera⁹ de las plantas. Entre los sistemas de este tipo cabe citar los siguientes:

⁵ Fernández et al. “Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación”.. Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

⁶ *Ibidem*.

⁷ Fitosistema: empleo de la energía solar a través de los procesos biológicos naturales (fotosíntesis) que se emplea en los sistemas de depuración (*ibidem*).

⁸ Fernández et al. “Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación”.. Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

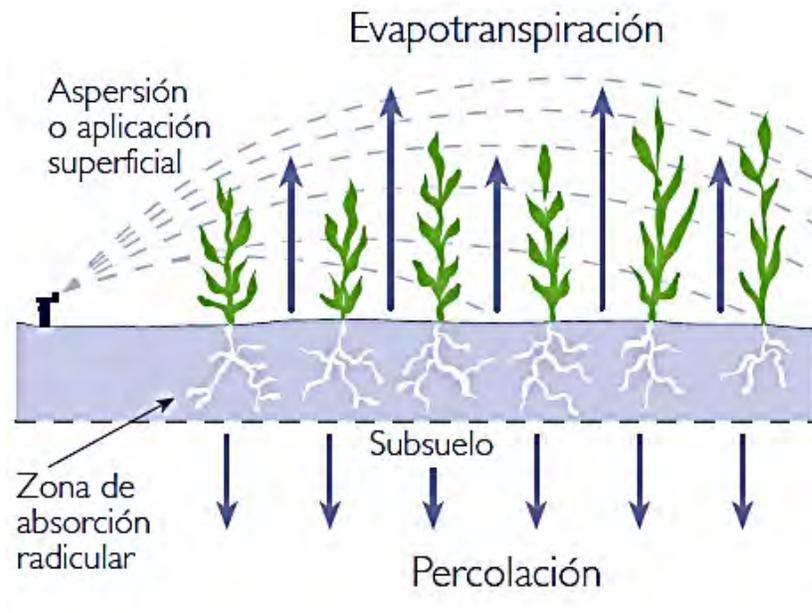
⁹ Rizosfera: parte del suelo inmediato a las raíces donde tiene lugar a una interacción dinámica con los microorganismos. (Rizosfera, (2013, Julio 4). Recuperado 9:38, Julio 4, 2013, Wikipedia, Enciclopedia libre: <http://es.wikipedia.org/wiki/Rizosfera>)

a) Riego sobre superficies herbáceas:

La depuración del agua a tratar se consigue tanto en el paso del agua a través del suelo como por la absorción de las plantas, existiendo fenómenos de evapotranspiración, que eliminan parte del agua a la atmósfera.

Los objetivos principales de este sistema pueden ser: mejora de cosecha, riego de zonas de recreo, parques, etc.

Imagen 1: Tratamiento por riego sobre superficies herbáceas¹⁰

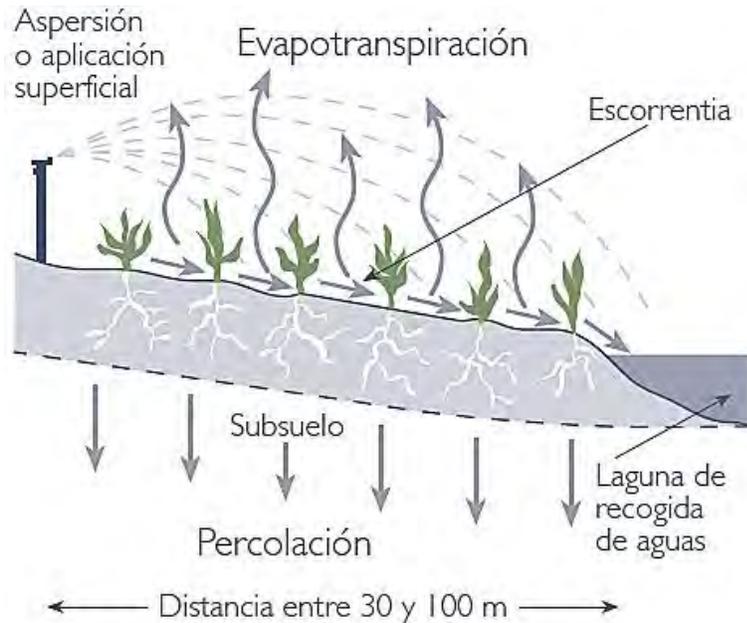


b) Escorrentía sobre cubierta vegetal:

Se utilizan especies de rápido crecimiento que están adaptadas a vivir en suelos húmedos o encharcados. En este tipo de filtros, junto a la actividad depuradora, se busca el aspecto de rentabilidad de la producción, ya sea como madera o como simple biomasa con fines energéticos.

¹⁰ Fernández et al. "Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación". Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

Imagen 2: Tratamiento por escorrentía sobre cubierta vegetal¹¹



c) Filtros verdes de especies leñosas:

La aplicación se realiza mediante sistemas de aspersión fijos. La depuración del agua se produce mediante sistemas físicos, químicos y biológicos al discurrir la misma a través de la vegetación, a lo largo de una pendiente.

Los objetivos del sistema pueden ser:

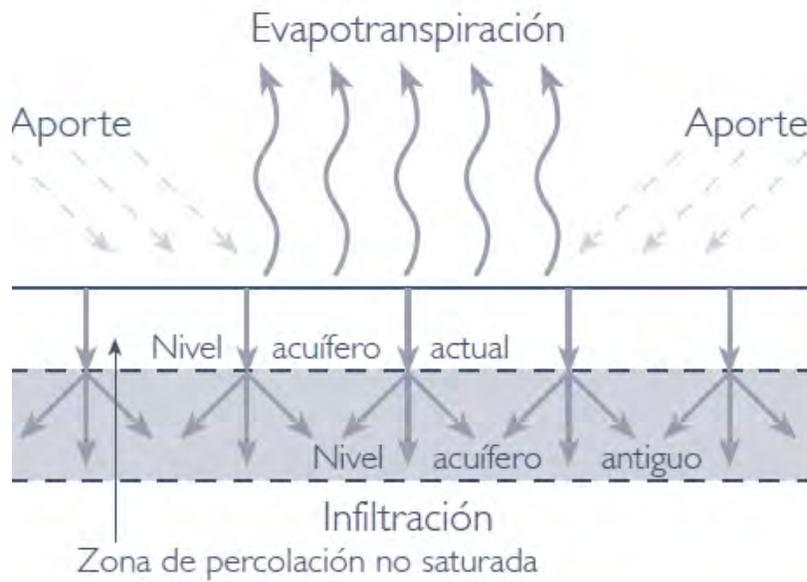
- Mejora de producción de las cosechas.
- Producción de cultivos agroenergéticos.

d) Infiltración:

La aplicación se puede realizar por medio de diversos sistemas de riego tales como aspersión, surco o gravedad, o inundación, siendo los más idóneos, en cuanto a nivel de resultados, los dos últimos, y de ambos, el de inundación.

¹¹ Fernández et al. “Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación”. Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

Imagen 3: Tratamiento por infiltración en el terreno¹²



4.1.1.3. Humedales

Son zonas en las que prolifera una vegetación acuática característica perfectamente adaptada a tener todos o parte de sus órganos sumergidos en el medio acuoso. En el siguiente apartado se extiende su explicación.

Imagen 4¹³: Humedal natural



¹² Fernández et al. "Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación". Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

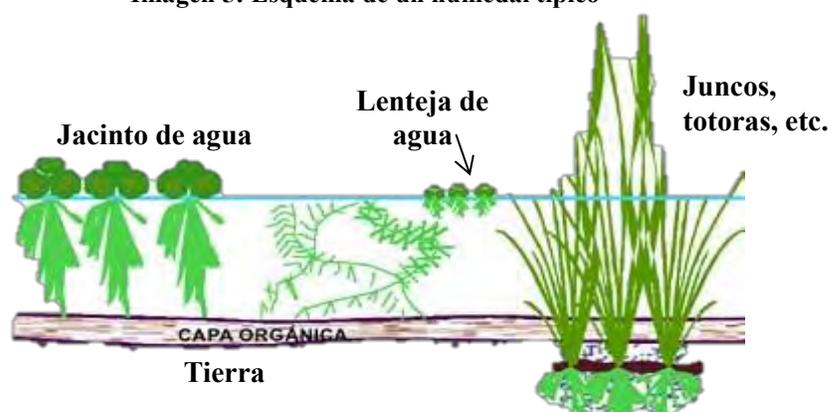
¹³ Extraído 17 de Julio del 2013. 11:19. <http://www.ruralcostarica.com/fotos2.html>

4.2. Humedales

Pueden ser naturales o artificiales y la inundación puede ser temporal o permanente. En estos humedales se da una actuación simultánea y complementaria de las plantas superiores y los microorganismos, que favorece la degradación de la materia orgánica. Por este motivo se utilizan los humedales naturales o artificiales para la depuración de aguas residuales¹⁴.

La Imagen 5 presenta un esquema de los humedales. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la absorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar¹⁵.

Imagen 5: Esquema de un humedal típico¹⁶



Tienen tres funciones básicas que los hacen tener un potencial para el tratamiento de aguas residuales¹⁷:

- Fijan físicamente los contaminantes y la materia orgánica en la superficie del suelo.
- Utilizan y transforman los elementos por intermedio de los microorganismos.
- Logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

4.2.1. Humedales en el Perú

En 1989, mediante el Decreto Supremo N° 036-89PCM, se declaró de interés para la Nación la elaboración de una Estrategia Nacional de Conservación, para lo cual se creó una comisión para la protección de humedales. Estos humedales fueron reconocidos por la

¹⁴ Fundación peruana para conservación de la naturaleza. Documento base para la elaboración de una estrategia de conservación de los humedales de la costa peruana. Lima, Setiembre 2010.

¹⁵ Rodríguez, J. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades. Universidad de Sonora. 2009.

¹⁶ Llagas, W. y Guadalupe, E. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Rev. Inst. investig. Fac. Minas metal cienc. geogr, ene./junio 2006, vol.9, no.17, p.85-96. ISSN 1561-0888.

¹⁷ Rodríguez, J. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades. Universidad de Sonora. 2009.

Convención RAMSAR¹⁸, que tiene por objetivo impedir la pérdida de los humedales y asegurar su conservación. Por ello se establecen ciertas obligaciones respecto a la conservación de los humedales en los países signatarios y obligaciones especiales con relación a los humedales que las Partes Contratantes hayan inscrito en la “Lista de Humedales de Importancia Internacional¹⁹”.

En el Perú, el 26 de Noviembre de 1991, el Congreso de la República, mediante Resolución Legislativa N° 25353, ratificó la suscripción como país signatario de la Convención RAMSAR. En el siguiente apartado se presentan los lugares RAMSAR para el Perú. A la fecha de Setiembre del 2010, se reconocieron un total 92 humedales costeros: 56 naturales, 11 artificiales, 11 extinguidos y 14 desembocaduras de ríos. A continuación se relacionan los humedales naturales y artificiales²⁰:

a. Naturales:

- Manglares de Tumbes, Tumbes
- Virrilá, Piura
- La Niña, Piura
- Letirá, Piura
- Ñapique, Piura
- Mancoche, Lambayeque
- Eten Pueblo, Lambayeque
- Guadalupito, La Libertad
- Tres Chozas, La Libertad
- Chao, La Libertad
- Comositán, La Libertad
- El Carmelo-Virú, La Libertad
- Puerto Morí o Punta Guañape, La Libertad
- Salaverry, La Libertad
- Pozo del Diablo, La Libertad
- Tres Palos-El Charco, La Libertad
- Boca de Río Chicama, La Libertad
- Boca La Grama, La Libertad
- San Bartolo, La Libertad
- El Tubo, La Libertad
- Cañoncillo, La Libertad
- Boca de Río Jequetepeque, La Libertad
- Las Salinas, Ancash
- Casma, Casma-Ancash
- Santa María, Chimbote-Ancash
- La Toma, Huarmey

¹⁸ Tratado internacional gubernamental que brinda las bases para la cooperación internacional en lo referido a la conservación de los humedales

¹⁹ Fundación peruana para conservación de la naturaleza. Documento base para la elaboración de una estrategia de conservación de los humedales de la costa peruana. Lima, Setiembre 2010

²⁰ *Ibidem*.

- El Campanario, Huarney
- El Gallinazo, Huarney
- Fortaleza, Barranca
- Barranca, Barranca
- Medio Mundo, Huacho
- Carquín, Huacho
- Paraíso, Huacho
- Encantada, Huacho
- Hatillo, Chancay
- Santa Rosa, Chancay
- Ventanilla, Ventanilla
- La Punta, Callao
- Pantanos de Villa, Chorrillos
- Salinas de Chilca, Chilca
- Puerto Viejo Chilca y San Antonio
- Humedal de “Agua Santa”, Ica
- Humedal Laguna “El Pozón”, Ica
- Humedal Laguna “El Caucato”, Ica
- Humedal Laguna “Morón”, Ica
- Humedal de Costarica, Ica
- Humedal de “San Andrés”, Ica
- Humedal de Pisco Playa, Ica
- Humedal de Leticia, Ica
- Humedal Laguna “El Frontón”, Ica
- Laguna “El Centenario”, Arequipa
- Santuario Nacional Lagunas de Mejía, Arequipa
- Humedales de Pucchun, Arequipa
- Albufera de Quilca, Arequipa
- Humedal de Ite, Tacna
- Albufera Boca de Río, Tacna

b. Artificiales:

- Reservorio Los Ejidos, Piura
- Reservorio Tinajones, Lambayeque
- Reservorio Lache, La Libertad
- Balsares de Huanchaco, La Libertad
- Laguna La Molina, La Molina
- Bujama, Bujama
- Las Hienas, Cañete
- Reservorio Huacatatoma, Ñepeña
- Baños Boza, Aucallama
- Reservorio “El Caucato”, Ica
- Laguna “Huacachina”, Ica

En lo que concierne a Piura, se obtuvo información complementaria de los diferentes humedales (Tabla 1²¹):

Tabla 1: Humedales de Piura

Nombre	Ubicación	Características	Nº de hábitats	Nº de especies plantas	Nº de especies de aves	Protección
Reservorio Los Ejidos	9429837.87S / 542633.26E	Estanque artificial (Represa)	6	6	10	No
Estuario de Virrilá	9352412N/ 518147E	Estuario	7	7	36	Sí
Letirá	9407054N/ 520962E	Se encuentra en lagunas costeras de agua dulce	7	8	7	No
Ñapique	9388813N/ 532971E	Se encuentra en lagunas costeras de agua dulce	3	4	36	Sí

4.2.2. Fitodepuración en humedales

La fitodepuración ocurre naturalmente en los ecosistemas que reciben aguas contaminadas y, junto a la denominada autodepuración de las aguas, ha sido el procedimiento clásico de recuperación de la calidad del agua. Este proceso ocurre tanto en humedales naturales como en artificiales (creados por el hombre)²².

El concepto estricto de fitodepuración puede aplicarse cuando existe la intervención de cualquier tipo de organismo fotosintético, ya sean plantas superiores (macrofitas) como algas macroscópicas o microscópicas. Sin embargo, el concepto más generalizado del término, lleva actualmente implícito la intervención de macrofitas. Los procedimientos de tratamiento de aguas por lagunaje –en los que hay intervención de microalgas- no serían por tanto objeto de la fitodepuración. Por tanto, la fitodepuración refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrofitas)²³.

²¹ Fundación peruana para conservación de la naturaleza. Documento base para la elaboración de una estrategia de conservación de los humedales de la costa peruana. Lima, Setiembre 2010

²² Fernández et al. “Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación”. Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

²³ *Ibidem*.

4.2.3. Tipos de humedales

4.2.3.1. Humedales naturales

Son aquellos lugares terrestres que permanecen inundados o saturados de agua durante, un tiempo suficientemente prolongado como para que se desarrolle en ellos un tipo de vegetación característica, palustre²⁴, que está adaptada a esas condiciones, por ejemplo:

- Espadañales (Imagen 8²⁵)
- Carrizos (Imagen 9²⁶)
- Juncales (Imagen 11²⁷)
- Lirios de agua (Imagen 10²⁸)

Imagen 7: Carrizos

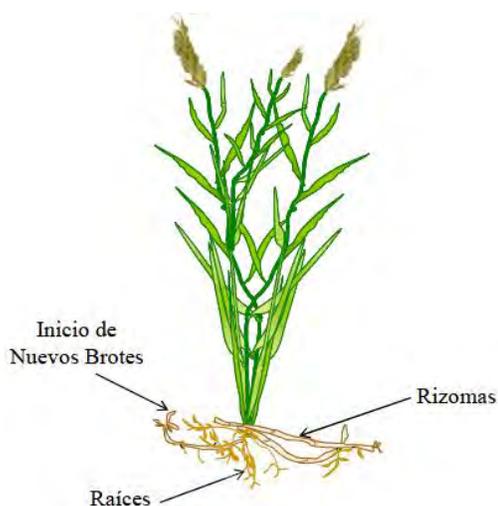


Imagen 6: Espadañales



²⁴Palustre: Relativo a laguna o pantano. (RAE).

²⁵Foto personal, typha domingensis. Represa Los Ejidos, Piura.

²⁶García S., Joan \$ Corzo H., Angélica. Depuración con humedales construidos. Catalunya, 2008.

²⁷López, L. La caída del junco. Mayo del 2013. http://api.ning.com/files/LiMXav22Ftm*QkneRqAU9-U00EtnEJ0ZOmIGOk4piiyqyImDn91O7urVQeXujHho8SzVjLNlaL1F098kGcRN-OYX3mjt7kk/junco01.jpg

²⁸Extraído 10 de Julio 2013, 12:22. http://www.venezuelatuya.com/fotos/unafoto.htm?1201,lirio_de_agua

Imagen 9: Juncales



Imagen 8: Lirios de agua



Son sistemas de transición entre los ambientes terrestres y los acuáticos, por lo que sus límites suelen ser difusos y su morfología variable con el tiempo, mostrando ciclos temporales más o menos acusados y un extraordinario dinamismo²⁹.

Los humedales se reconocen fácilmente por un conjunto de características generales, como son la presencia de una lámina de agua poco profunda o capa freática en superficie sobre suelos hidromorfos, y la existencia de una vegetación especializada, ya sean plantas que viven en el agua (hidrofitos) o las que se desarrollan en terrenos permanentemente inundados o al menos saturados de agua, con bastante frecuencia (higrofitos). Uno de los rasgos más característicos de la vegetación de los humedales es su adaptación a vivir con una fuerte limitación de disponibilidad de oxígeno en el suelo, es decir, en condiciones anaerobias que normalmente no soportan las plantas terrestres³⁰.

Ejemplo de ellos son los manglares de Vice (Imagen 10), que son los manglares más antiguos de la costa Pacífico de Sudamérica, junto al estuario de Virrilá y las lagunas de Ramón y Ñapique, forman el complejo de humedales de Piura³¹.

²⁹ Fernández et al. “Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación”. Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

³⁰ *Ibidem*.

³¹ Extraído de: <http://www.birdlife.org/community/2010/07/los-manglares-mas-australes-de-la-costa-pacifica-son-incluidos-en-una-red-internacional-de-conservacion/>, 18 de Julio del 2013, 09:50.

Imagen 10: San Pedro de Vice, Piura³²



4.2.3.2. Humedales artificiales

Los humedales artificiales pueden ser estanques de acuicultura, tierras de regadío, zonas de explotación de sal, áreas de almacenamiento de agua, reservorios, diques, represas hidroeléctricas, etc. Aquellas donde el hombre ha utilizado métodos donde se necesita retener agua o según Acevedo³³, consisten normalmente en un monocultivo o policultivo de plantas superiores en lagunas, tanques o canales poco profundos. El efluente, normalmente después de recibir un pre-tratamiento, pasa a través del humedal durante el tiempo de retención. Fernández³⁴, explica que son aquellos que han sido construidos por el hombre para el tratamiento de aguas residuales.

Son estanques o canales de poca profundidad (<1m) en los que se implantan especies vegetales adaptadas a la vida acuática y en los que la depuración se basa en procesos naturales de tipo microbiológico, biológico, físico y químico. Su diseño es muy variado, pero siempre incluye canalizaciones, aislamiento del suelo para evitar el paso de la contaminación a los ecosistemas naturales circundantes y el control del flujo del efluente en cuanto a su dirección, flujo, tiempo de retención y nivel de agua³⁵.

³²Extraído de: <http://www.birdlife.org/community/2010/07/los-manglares-mas-australes-de-la-costa-pacificason-incluidos-en-una-red-internacional-de-conservacion/>, 18 de Julio del 2013, 09:50.

³³ Acevedo et al. Filtro de macrofitas en flotación. España, 2008.

³⁴ Fernández et al. "Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación". Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

³⁵ Ibídem.

Imagen 11: Represa Los Ejidos, humedal artificial de Piura³⁶



4.3. Humedales artificiales para la depuración

Los tratamientos de las aguas residuales han evolucionado a lo largo de su corta historia, actualmente los principales cambios que deberían experimentar las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) están relacionados con objetivos científico-tecnológicos que buscan³⁷:

- Mejorar la calidad de las aguas a la salida de las instalaciones, de modo que permitan un incremento significativo de su reutilización.
- Posibilitar el uso de recursos que puedan obtenerse de las aguas.
- Conseguir la minimización de la producción y/o la revalorización de los fangos producidos.
- Minimizar la dependencia energética para conseguir unas instalaciones más sostenibles.

Son también llamados “*constructed wetlands*”. El oxígeno necesario para estos procesos es suministrado por las propias plantas, que forman por fotosíntesis o toman del aire e inyectan hasta la zona radicular. La transferencia de oxígeno hacia la zona radicular por parte de estas plantas acuáticas es un requisito indispensable para que la eliminación microbiana de algunos contaminantes se realice con eficacia, estimulando además la degradación de materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes. Los

³⁶ Foto personal. Represa Los Ejidos, Piura

³⁷ Hidrosun Ingeniería S.L. Sistema de filtros de macrofitas en flotación. Nd.

mecanismos que tiene lugar para la depuración de contaminantes constituyen una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos³⁸.

Las plantas juegan un papel fundamental en estos sistemas siendo sus principales funciones³⁹:

- Aireación del sistema radicular y facilitar oxígeno a los microorganismos que viven en la rizosfera.
- Absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- Eliminación de contaminantes asimilándolos directamente en sus tejidos.
- Filtración de los sólidos a través del entramado que forma su sistema radicular.

La selección de las especies vegetales se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de las mismas al clima local, su capacidad de transportar oxígeno desde las hojas hasta la raíz, su tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes, su capacidad asimiladora de los mismos, su tolerancia a condiciones climáticas diversas, su resistencia a insectos y enfermedades y la facilidad de manejo.

4.3.1. Tipos de humedales artificiales

Se han propuesto diversos diseños de humedales artificiales a lo largo de su desarrollo tecnológico, las variables de diferenciación pueden hacer referencia al sistema de flujo de agua residual, sustrato o lecho utilizado, vegetación y sucesión de unidades de tratamiento⁴⁰. Entre los diferentes tipos tenemos:

4.3.1.1. Humedales de flujo superficial⁴¹

También conocidos como en inglés: Surface Flow Wetlands o Free Water Surface, FWS. El flujo del agua es de tipo horizontal superficial. El agua se hace discurrir por la superficie de un canal o estanque que contiene una capa de agua no muy profunda, generalmente de unos 30 cm, aunque puede llegar a ser más de 1m.

Los sistemas FWS se configuran con una apariencia similar a los humedales naturales. Hay una combinación de espacios con la lámina de agua a la vista y otros con cobertura total por vegetación acuática, generalmente con dominancia de macrofitas emergentes enraizadas en el sustrato que se haya dispuesto en el fondo del canal o estanque; también pueden incorporar especies acuáticas flotantes, y especies vegetales sumergidas.

En estos sistemas el sustrato en que están enraizadas las plantas tiene una baja conductividad y no permite un flujo significativo a través de la zona radicular. La eliminación de contaminantes se produce a través de reacciones que tienen lugar en el agua

³⁸ Fernández et al. “Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación”. Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

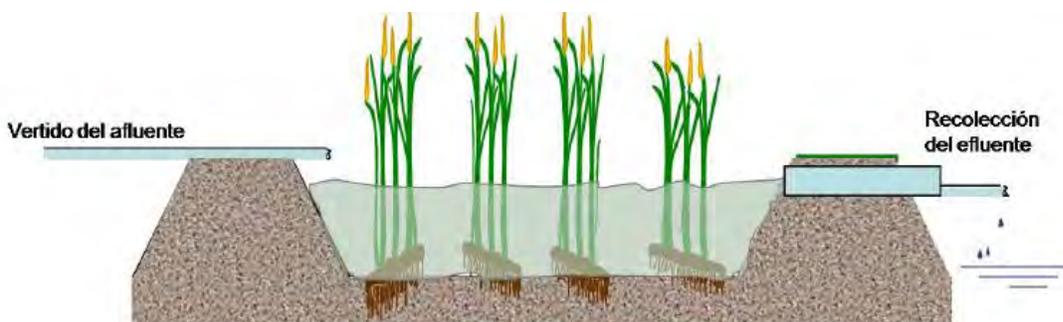
³⁹ *Ibidem*.

⁴⁰ Acevedo et al. Filtro de macrofitas en flotación. España, 2008.

⁴¹ Fernández et al. “Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación”. Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

y en la zona superior del sustrato, por lo que su potencial de eliminación se ve fuertemente restringido.

Imagen 12: FWS



Fuente: García s., Joan & Corzo H., Angélica. Depuración con humedales construidos. Catalunya, 2008.

4.3.1.2. Humedales de flujo sub-superficial⁴²

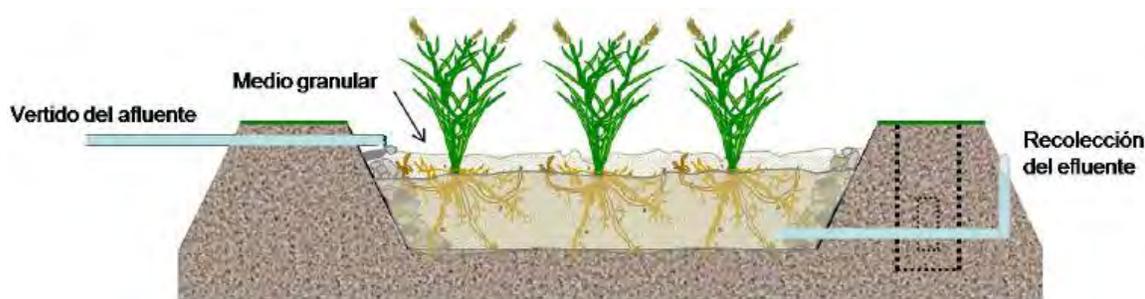
Conocido como en inglés: Sub-surface Flow Wetlands, Vegetated Submerged Bed o Sub-surface Flow, SsF. En los sistemas SsF, el flujo del influente es de tipo horizontal sub-superficial, es decir, que el agua se hace discurrir por debajo de la superficie del sistema. De modo semejante al sistema FWS, se diseñan a modo de estanques con paredes y bases estancadas y las debidas canalizaciones y dispositivos de control de flujo.

Lo que realmente define al humedal SsF es que no hay una columna de agua continua, sino que el influente circula a través de un medio inerte, que consiste en un lecho de arena y/o grava de grosor variable, que sostiene la vegetación. Este lecho se diseña de modo que permita la circulación del agua residual a través del sistema radicular de las macrofitas acuáticas. El agua se puede mover tanto de forma horizontal como verticalmente.

En los sistemas de flujo sub-superficial no existe lámina de agua a la vista del observador, y el conjunto solo recuerda vagamente los humedales naturales por el tipo de vegetación.

⁴² Fernández et al. "Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación".. Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

Imagen 13: SsF



Fuente: García, J. & Corzo, A. Depuración con humedales construidos. Catalunya, 2008.

4.3.1.3. Filtro de macrofitas en flotación "FMF"⁴³

Es un sistema que combina las ventajas de los sistemas de humedales artificiales FWS y de los sistemas acuáticos, que a su vez reduce sus inconvenientes. Ha sido desarrollado por el Grupo de Agroenergética del Departamento de Producción Vegetal: Botánica, la E.T.S de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid (patentado con el título: "Procedimiento de depuración de aguas residuales y vertidos contaminantes en base a cultivos de macrofitas emergentes convertidas en flotantes" N° de patente P9700706).

Su estructura y tipo de flujo es similar al de los humedales FWS, en cuanto a que se trata de canales debidamente aislados, con flujo superficial. El rasgo diferencial más notable es el que se refiere al manejo de la vegetación emergente como vegetación flotante.

A la ventaja de tener siempre el sistema radicular bañado por el agua residual sin posibilidad de colmatación, propio de los sistemas que utilizan plantas flotantes, se une la ventaja de utilizar plantas macrofitas de gran porte que pueden producir una gran cantidad de biomasa, lo que posibilita el funcionamiento del sistema sin necesidad de retirar la biomasa durante períodos significativamente más largos.

4.4. Descripción de los filtros con macrofitas en flotación

El corazón del sistema está construido por un tapiz flotante de vegetación, formado sobre la superficie de un canal o laguna, cuyos elementos básicos son las plantas, especies seleccionadas entre las de tipo "emergente", adaptadas a la climatología del lugar, que van a tener sumergido en el agua su sistema radicular y una parte de la base del tallo.

La mayoría de las plantas acuáticas tienen también rizomas, que son estructuras de reproducción vegetativa de las que salen nuevos brotes y que contienen abundante cantidad de hidratos de carbono como sustancia de reserva. Estos rizomas se encuentran sumergidos en el agua junto a las raíces y unidos a la base del tallo de procedencia. Toda la zona sumergida de la planta tiene una gran superficie específica, debido principalmente al gran

⁴³ Fernández et al. "Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación". Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

número de raíces y raicillas, que actúan de soporte para la fijación de los microorganismos que degradan la materia orgánica, cuyo crecimiento se ve favorecido por el oxígeno que les llega a través de las raíces bombeado desde las hojas de las plantas, la cual es una propiedad específica de las plantas emergentes y flotantes⁴⁴.

Las macrofitas emergentes en general tienen un cierto desarrollo en altura y una densidad menor que la unidad, por lo que para lograr la flotación y desarrollo de este tipo de plantas hay que conseguir que la parte sumergida forme una base de suficiente consistencia y extensión en superficie, que permita el desarrollo de las hojas y los tallos por encima de la superficie del agua, según su altura natural, evitando la tendencia al vuelco que tendría una planta aislada⁴⁵.

Este sistema solo consume energía natural (solar) por lo que se le puede clasificar como del tipo blando; se agrega además el hecho de tratarse de un proceso natural basado en plantas emergentes, convertidas en flotantes. La oxigenación del agua se realiza mediante el oxígeno trasladado desde las hojas hasta el sistema radicular y de ahí al agua. El proceso inicia tras el contacto de las hojas con el oxígeno, éste pasa de la superficie de las hojas a los tubos que están en contacto con ella, en esa zona y de éstos a otros tubos situados a continuación en la dirección descendente, iniciándose de esta manera el descenso del oxígeno de forma continua hasta sus raíces y rizomas⁴⁶.

En la Imagen 16⁴⁷, se muestra como estas plantas se encargan de canalizar el oxígeno del aire al agua a través de sus hojas aerobias quienes lo transmiten hasta la zona radicular. Así, el oxígeno es transmitido de las raíces al medio y es aprovechado por las bacterias que se encuentran en el agua para depurarla. El rendimiento conseguido es tan alto que el agua de salida puede ser reutilizada para nuevos usos⁴⁸.

⁴⁴ Fernández et al. "Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación". Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

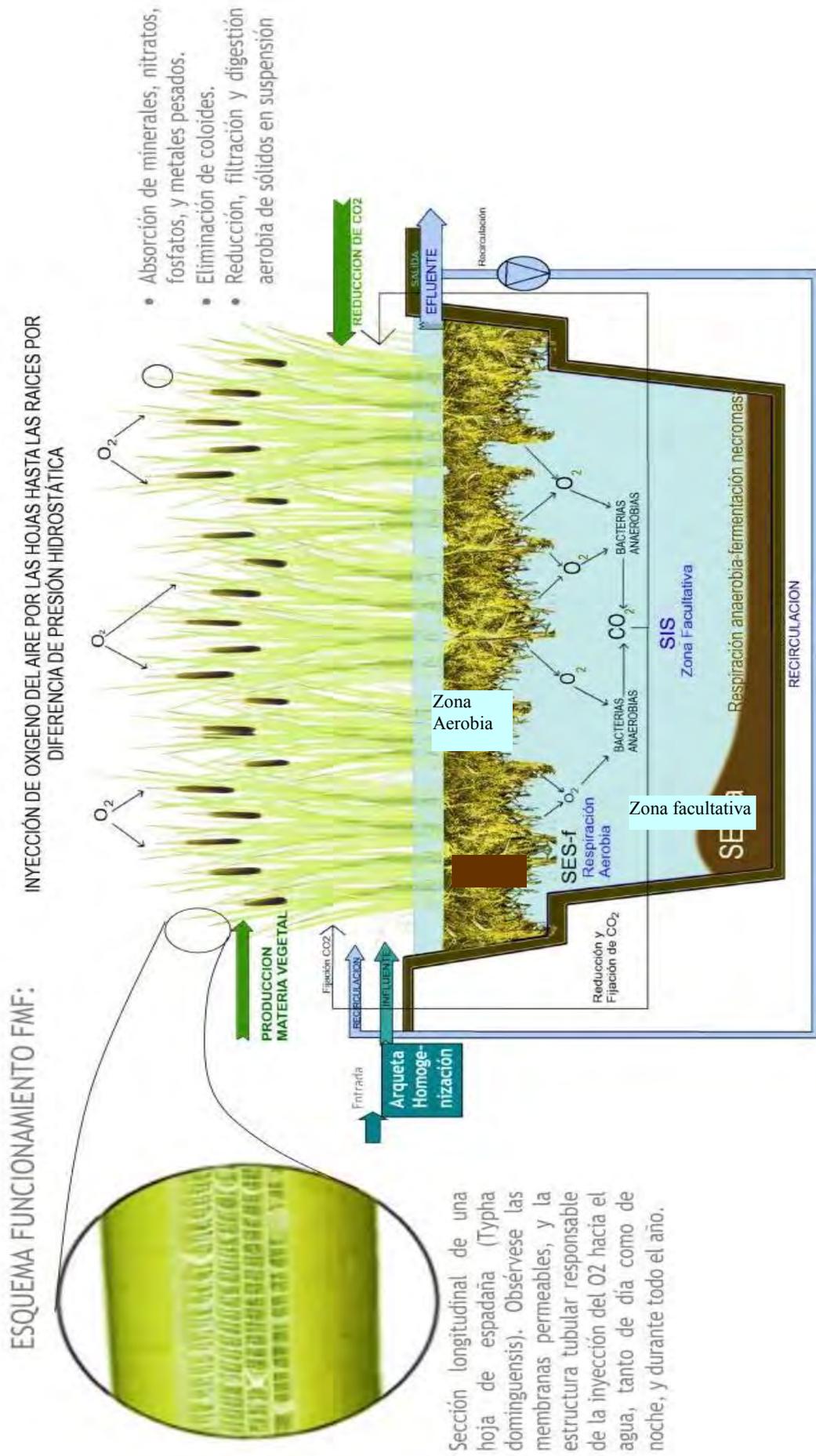
⁴⁵ *Ibidem*.

⁴⁶ Torres, V. El filtro de macrofitas en flotación para la depuración de las aguas residuales y la regeneración de ríos, lagos. Madrid, 2010.

⁴⁷ Empresa Macrofitas SL.jpg.

⁴⁸ Gallego, L. Depuración de aguas residuales mediante el sistema hidrolution FMF y su aplicación a la agricultura y ganadería. Febrero 2012.

Imagen 14: Sistema FMF



Sección longitudinal de una hoja de espadaña (*Typha domingensis*). Obsérvese las membranas permeables, y la estructura tubular responsable de la inyección del O₂ hacia el agua, tanto de día como de noche, y durante todo el año.

Las especies que se han adaptado a este tipo de humedales y que emergen del agua son: las espadañas (aneas o eneas⁴⁹) que pertenecen al género de las *typhas*, los juncos, los esparganios (*sparganium*), los carrizos (*Phragmites*) y el lirio de agua (*iris pseudacorus*). Todas pueden sobrevivir gracias a una especialización única en todas ellas, la transferencia de oxígeno hacia la zona radicular y de ésta al agua, que es el requisito indispensable para que la eliminación microbiana, se pueda realizar con eficacia, de algunos contaminantes. Se estimula también el crecimiento de bacterias nitrificantes y la degradación de la materia orgánica⁵⁰.

Si se quiere que la macrofita depure con su máxima eficacia, hay que respetar sus hojas; solo se podría segar al final de la primavera para extraer la biomasa vegetal y con ésta los nutrientes y metales que acumuló en ellas, y que ha estado incorporando a sus tejidos durante su crecimiento. Con la siega⁵¹ realizada en el período adecuado se consigue extraer los elementos eutrofizantes que llevaba el agua residual que se ha estado depurando, sin disminuir el rendimiento de depuración del filtro de macrofitas en flotación⁵².

Imagen 15: Raíces de la planta emergente



Este tipo de filtro es capaz de realizar un tratamiento secundario y terciario del agua residual, eliminando no solo materia orgánica, sino también fósforo y nitrógeno. Al crecer flotando, estas especies forman una densa esponja de raíces (Imagen 17⁵³) y rizomas que ocupan todo el volumen del vaso (laguna o canal), y obligan a que el agua circule por esta

⁴⁹ Según las regiones.

⁵⁰ Torres, V. El filtro de macrofitas en flotación para la depuración de las aguas residuales y la regeneración de ríos, lagos. Madrid, 2010.

⁵¹ Siega: Cortar la hierba con la hoz.

⁵² Acevedo et al. Filtro de macrofitas en flotación. España, 2008.

⁵³ Imagen extraídas de 05 Julio 2013, 11:14.

<http://www.hidrolution.com/test/sp/secciones/hidrolution/hidrolution-presentacion-tecnica.html>

maraña de vegetación, y que actúe a su vez de soporte de los microorganismos que degradan la materia orgánica⁵⁴.

Una vez estabilizado el sistema, se produce una gran cantidad de biomasa, que debe ser retirada mediante cortes periódicos para que el sistema siga bombeando nutrientes. Esta biomasa alcanza los 2,23 kg/m² de materia seca anual de la parte aérea para el caso de la enea (*Typha latifolia* L.), que puede ser utilizada en alimentación ganadera o con fines energéticos (1 m² de caña produce igual poder calorífico que 1 litro de petróleo). También se almacenan anualmente 1 kg/m² de azúcares y almidón en los rizomas, que podrían ser utilizados en la producción de etanol⁵⁵.

4.4.1. Estructura de una macrofita⁵⁶

En las macrofitas sin tallo (juncos, eneas, esparganios, etc.) tanto las hojas (Imagen 19⁵⁷) como las raíces tienen una estructura formada por multitud de tubos de pequeña sección unidos lateralmente y compartiendo las paredes de éstos longitudinalmente. Estos tubos son huecos y continuos a lo largo de toda la longitud de la hoja, se hallan cerrados transversalmente a tramos por una membrana del mismo tipo de material que el de la pared del tubo. La distancia entre las membranas que cierran el tubo no suele ser de más de 10 veces el diámetro de éste, siendo la sección transversal de una hoja se parece mucho a la de un panal de abejas. Cada uno de los tubos que forman la hoja, al terminar en la cubierta de ésta, presenta una gran superficie de contacto con el exterior, si la comparamos con su diámetro estaría del orden de más de 50 veces, en definitiva la relación sería la misma que la relación entre la longitud de la hoja y su diámetro.

Tanto la cubierta exterior de cualquiera de las partes de la planta macrofita, es decir las hojas, rizomas, tallos (Imagen 18⁵⁸), raíces, así como como las paredes de los tubos que tiene la estructura de la macrofita es una membrana especializada, en dejar pasar solo la molécula de oxígeno de una superficie a otra de las caras de la membrana, en función de la diferencia de la presión de saturación de oxígeno que se tenga entre las caras de ésta.

El sentido de paso del flujo de oxígeno es siempre desde la superficie que tiene mayor presión a la de menor presión de oxígeno. El caudal de oxígeno que pasa de un lugar al otro varía con arreglo a la diferencia de la presión isostática; esta última depende de la presión física y de la concentración de oxígeno.

⁵⁴ Fernández & de Miguel. La depuración de aguas mediante filtros verdes en el medio rural. El problema de las aguas residuales. Madrid, Marzo 2005.

⁵⁵ *Ibidem*.

⁵⁶ Torres, V. El filtro de macrofitas en flotación para la depuración de las aguas residuales y regeneración de ríos, lagos... nd, Madrid.

⁵⁷ Imagen extraídas de 05 Julio 2013, 11:14.

<http://www.hidrolution.com/test/sp/secciones/hidrolution/hidrolution-presentacion-tecnica.html>

⁵⁸ *Ibidem*.

Imagen 16: *Typha dominguensis*, tallo.



Imagen 17: *Typha dominguensis*, hoja.



La densidad relativa de la macrofita está en torno al 0,6; mientras las densidades relativas de las hojas es de 0,3 y la de las raíces 0,85; motivo por lo que puede forzarse a pasar de planta emergente a flotante⁵⁹.

4.4.1.1. Macrofitas de interés en fitodepuración

Las principales plantas utilizadas son emergentes o helófitas⁶⁰, como las eneas (*Typha spp.*) y el carrizo (*Phragmites australis*), e higrófitos⁶¹, como los juncos (*Scirpus spp.*). De ellas, las que mejor trabajan en la fitodepuración:

a) *Typha spp* (Familia Typhaceae)

Son plantas acuáticas con sistema radicular arraigado en el fango o fondo del humedal, y estructura vegetal que emerge por encima de la lámina de agua; por esa razón también se denominan macrofitas emergentes, pueden alcanzar más de 3 m de altura.

Las especies de interés en esta familia de plantas está representado por 3 especies: *Typha Latifolia L.*, *Typha angustifolia* y *Typha dominguensis*⁶².

⁵⁹ Acevedo et al. Filtro de macrofitas en flotación. España, 2008.

⁶⁰ Planta cuyos órganos persistentes están arraigados en el fondo sumergido, y cuyos tallos emergen y desarrollan hojas y flores e medio aéreo. Extraído 18 de Julio 2013, 18:21. <http://www.infojardin.net/glosario/habitat/helofito-helofitos.htm>

⁶¹ Plantas acuáticas que viven en el agua o en suelos inundados. Junto a los cuerpos de agua, la vegetación muestra una zonación que está determinada en parte por la profundidad creciente del agua. Extraído 18 de Julio 2013, 16:24. http://agr.unne.edu.ar/botanica/tema3/tema3_4hidrofita.htm

⁶² Fernández et al. “Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación”. Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

a.1) *Typha Latifolia* L.

Es una planta robusta que alcanza más de 2 m de altura. La vaina de la hoja está normalmente abierta en el extremo superior más próximo a la lámina, y se observan aurículas. La lámina de la hoja es de color verde grisáceo pálido, y tiene unos 8-20 mm de anchura. En el tallo floral las inflorescencias femenina y masculina están muy próximas entre sí (0-2,5 cm). La femenina es de color marrón muy oscuro, larga (8-15 cm de longitud) y bastante gruesa (2-3 cm de diámetro). En esta especie, los pelos que acompañan a la flor femenina salen a partir de una cierta longitud y no tienen escamas estériles⁶³ (Imagen 19).

Imagen 18: *T. Angustifolia*

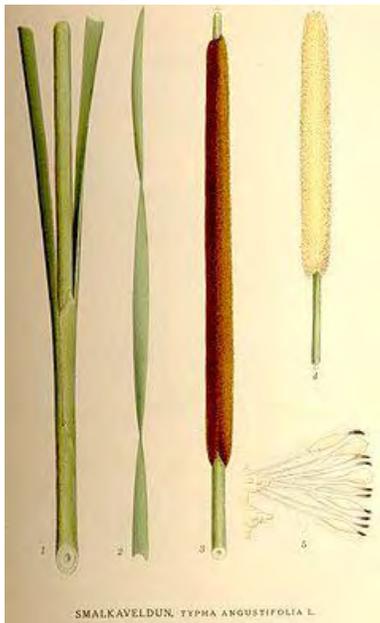


Imagen 19: *T. Latifolia*⁶⁴



a.2) *Typha angustifolia*

Es una planta esbelta, menos robusta que la especie anterior, que no suele sobrepasar los 2 m de altura. Los laterales de la vaina de la hoja, aunque no están soldados entre sí, son envolventes en toda su longitud, por lo que la vaina permanece cerrada en toda su longitud, incluso en la zona más próxima a la lámina. En esta especie también se observan, generalmente, aurículas en la parte superior de la vaina. La lámina de la hoja es de color verde oscuro, y es estrecha; su anchura es del orden de 3-6 mm. En el tallo floral las inflorescencias femenina y masculina están separadas entre sí por un amplio espacio (3-8 cm de longitud). La femenina es de color marrón oscuro a rojizo, más claro que la de *T. latifolia*; es muy alargada (8-20 cm de longitud) y en proporción, estrecha (1.3-2.5 cm de diámetro). En las flores femeninas los pelos sedosos se concentran en la parte basal; además, las flores llevan escamas estériles de color marrón oscuro, opaco, rígido y de forma espatulada (Imagen 20).

⁶³ Fernández et al. "Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación". Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

⁶⁴ Extraído 31 de Julio de 2013, 17:33. http://oldbogard.isu.ru/herb/herb.files/page_188.htm

a.3) *Typha dominguensis*

Es una planta más robusta que las anteriores, que puede alcanzar más de 3 m de altura, aunque en algunos aspectos puede confundirse con la *T. angustifolia*. La vaina de la hoja, como en la *T. latifolia*, está abierta en su extremo superior y en la parte interna se observan a simple vista glándulas mucilaginosas oscuras. No lleva aurículas marcadas. La lámina es de color verde pálido a amarillento, y es estrecha, aunque no tanto como la *T. angustifolia*. Su anchura es de 5-12 mm. Como en la *T. angustifolia*, las flores femeninas llevan escamas estériles, pero en la *T. dominguensis* son de color marrón claro, translúcidas y frágiles. La inflorescencia femenina es en proporción más estrecha que la de la *T. latifolia*, y en conjunto, tiene color canela.

Imagen 20: T. Dominguenis.



4.4.2. Selección de la *typha* a utilizar

Para la selección de la *typha* a utilizar, solo es necesario que se encuentre perfectamente adaptada en la región y que sea de fácil obtención.

Mediante el análisis de las diferentes *typhas* existentes, la *typha dominguensis* tiene las siguientes ventajas:

- Tiene una altura mayor que las demás, un 50% más que la siguiente en tamaño, *typha angustifolia*.
- Por envergadura, tiene mayor capacidad de captación de oxígeno.
- También su masa radicular es de mayor longitud, y por tanto una paralela capacidad de filtro.
- Tiene una mayor capacidad de corte, lo que permitirá un reuso más productivo para su compostación.
- Se encuentra perfectamente adaptada a los humedales existentes en la región.

4.4.3. Clases de depuradoras de filtro de macrofitas en flotación⁶⁵

4.4.3.1. Integradas

Son una solución óptima y sostenible para la construcción de nuevas depuradoras integradas en el medio ambiente. El sistema de filtro de macrofitas en flotación integrado en la naturaleza, depura el agua de forma sostenible, sin consumir energía, ni producir fangos u olores.

Este sistema es eficaz y autónomo, aportando soluciones prácticas a la depuración de aguas urbanas de pequeñas y medianas poblaciones con importantes ventajas diferenciales respecto a otros sistemas de depuración, especialmente por su bajísimo costo de explotación y su integración paisajística como jardines (Imagen 23⁶⁶).

Imagen 21: Sistema de FMF integradas



4.4.3.2. Recicladas

Son una solución óptima para la rehabilitación y modernización de antiguas depuradoras convencionales con problemas de funcionamiento.

En este tipo de aplicaciones las macrofitas suplen de forma natural la labor de aireación y oxigenación de lecho depurador, que se realiza habitualmente por medio de equipos electromecánicos de alto consumo energético. Por ello, es una eficaz y sencilla opción para la rehabilitación de depuradoras que han perdido su capacidad de tratamiento o que están en desuso por sus altos costos de explotación.

⁶⁵ Hidrolution FMF. Sistema de macrofitas en flotación. Madrid, 2010. www.hidrolution.com

⁶⁶ Hidrolution. Presentación técnica. Madrid, 2010.

Para la optimización del proceso se reutilizan los tanques de estaciones convencionales de tratamiento de aguas residuales, por lo que solo es necesario realizar ligeras reformas en las depuradoras antes de realizar la implantación del sistema de filtro de macrofitas en flotación. Adicionalmente, se puede complementar con algún nuevo tratamiento terciario para la mejora de calidad del vertido. Todo ello supone unos reducidos costos de obra civil, que se amortiza rápidamente con el ahorro energético conseguido, convirtiendo estas antiguas estaciones de tratamiento en modernas, eficaces y sostenibles depuradoras.

Imagen 22: Sistema de FMF recicladas⁶⁷



4.4.3.3. Mixtas

Son una solución ecológica en depuradoras de aireación prolongada o de fangos activos, para el ahorro energético, que aumenta y mejora la capacidad de tratamiento, la eliminación de olores y la reducción de fangos. La combinación del sistema de filtro de macrofitas en flotación con las técnicas de oxidación de forma natural, por medio de las propias plantas macrofitas, complementa la labor de aireación que se realiza habitualmente por medio de motores, aireadores o turbinas de alto consumo energético.

⁶⁷ Hidrolution. Presentación técnica. Madrid, 2010.

Imagen 23: Sistema de FMF mixtas⁶⁸



4.4.3.4. Islas

Son la solución para humedales naturales, lagunajes, pantanos, estanques naturales contaminados. Con esta tecnología se consigue evitar la eutrofización de lagos, lagunas, etc., tanto natural como artificial, creando auténticas islas integradas en el medio, para así abarcar la depuración de espacios naturales (Imagen 24)⁶⁹.

Imagen 24: Sistema de FMF islas



⁶⁸ Hidrolution. Presentación técnica. Madrid, 2010.

⁶⁹ *Ibíd.*

4.4.3.5. Industriales

Son la solución para tratamiento de purines, lixiviados, cárnicas, queserías, etc.

4.4.4. Fundamentos del sistema de filtro de macrofitas en flotación⁷⁰

El oxígeno tiende a pasar de la superficie exterior de la hoja al interior de los tubos de ésta. La presión isostática de oxígeno es siempre menor que la del aire exterior (en los huecos o tubos solo se tiene vapor de agua y oxígeno) por tener este último menos concentración de oxígeno. Así pues, el oxígeno que pasa a la hoja en la zona que emerge del agua, empieza a distribuirse y equilibrarse entre todos los tubos colaterales y a lo largo de cada uno de ellos descendiendo por éstos, hacia las raíces.

Cuando el oxígeno llega a la zona de la hoja sumergida, sucede que el agua en contacto con la pared de la hoja, demanda el oxígeno que está en los conductos tubulares de esta zona, a causa de la DBO y DQO del agua, que hace que la presión isostática de oxígeno sea menor en el agua que en el interior de los tubos, cediendo éstos parte del oxígeno que tienen hacia la zona de la demanda; no lo ceden del todo, porque existe también una fuerte demanda, que les reclama el sistema radicular que normalmente tiene condiciones eutrofizantes más severas que las de la lámina de agua que baña las hojas. Los tubos que más oxígeno dejan son siempre los que están más próximos a la zona exterior, por lo que el reparto de oxígeno siempre tiende a ser menor en las hojas hacia el agua, que el que solicita la zona sumergida. De esta forma, el reparto de oxígeno es más ecuánime y puede llegar mejor a las raíces (Imagen 27⁷¹).

Con respecto a la eliminación de microorganismos se puede mencionar un aspecto muy importante del sistema de filtro de macrofitas en flotación, que es el hecho de reducir drásticamente el número de microorganismos patógenos debido a la presencia de depredadores de éstos (protozoos⁷² y bacteriófagos⁷³) en la rizosfera de las plantas, siendo innecesaria la cloración del agua antes del vertido al cauce. A su vez, también se consigue la eliminación de los coloides del agua al ser atraídos éstos a las raíces a causa de la diferencia de cargas eléctricas, evitando el efecto espejo que se produce en el agua debido a la presencia de las partículas coloidales, que hacen que no pase la luz al interior del agua y que por lo tanto, se degrade la vida de los fondos de estanques y lagos.

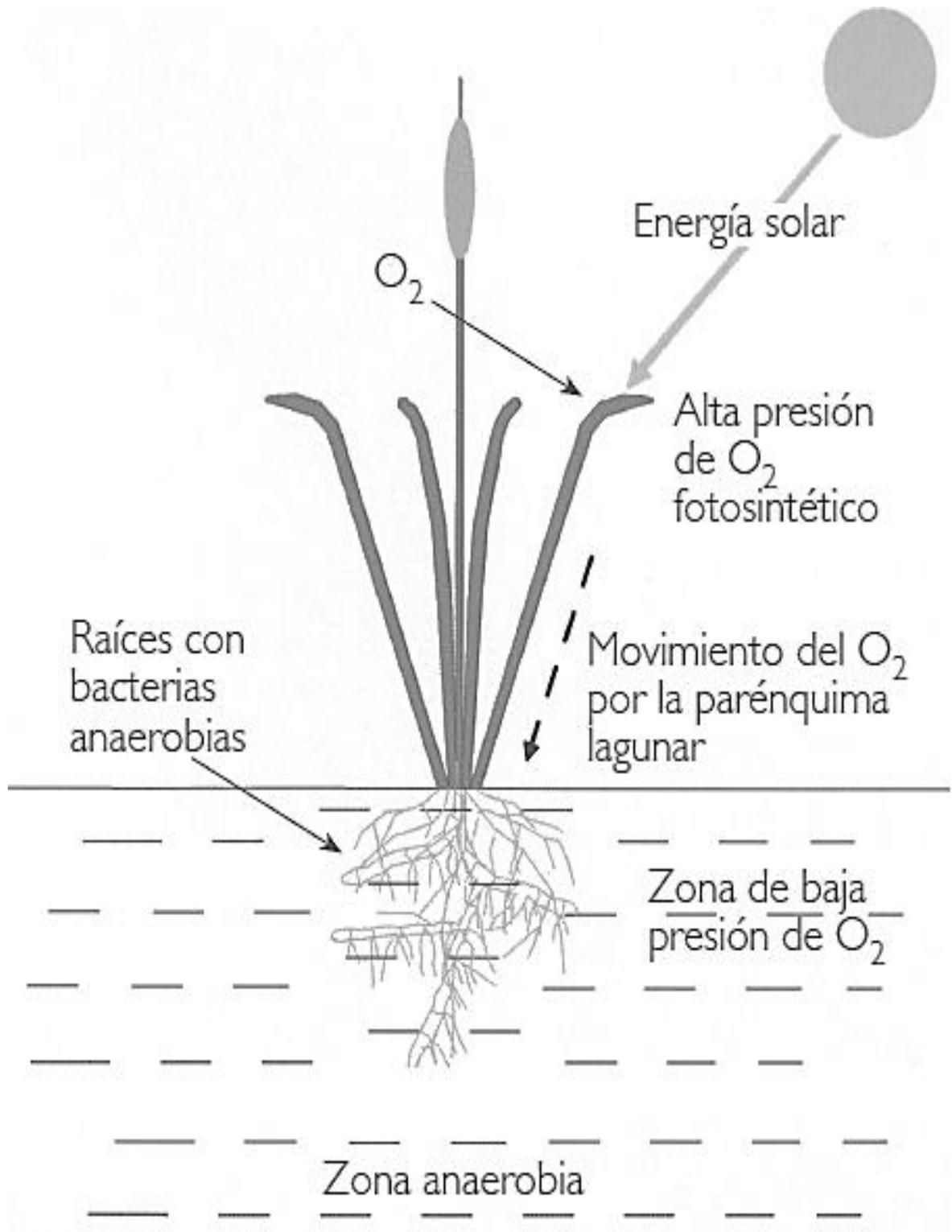
⁷⁰ Acevedo et al. Filtro de macrofitas en flotación. España, 2008.

⁷¹ Fernández et al. "Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación". Grupo de Agroenergética, Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, Diciembre 2010.

⁷² Protozoos: Se dice de los organismos, casi siempre microscópicos, cuyo cuerpo está formado por una sola célula o por una colonia de células iguales entre sí. Extraído del Diccionario de la Lengua Española-vigésima edición. 18 de Julio 2013, 16:43.

⁷³ Bacteriófagos: Virus que infecta las bacterias. Extraído del Diccionario de la Lengua Española-vigésima edición. 18 de Julio 2013, 16:45.

Imagen 25: Movimiento del oxígeno hacia la zona radicular



4.4.5. Ventajas y desventajas del sistema⁷⁴

4.4.5.1. Ventajas

- La demanda de energía es mínima.
- Garantiza la eficaz depuración independientemente de la estación del año.
- Bajo costo constructivo, costo en construcción entre 6 a 10 veces menos que una EDAR, por la técnica empleada en el tratamiento primario (separación de sólidos).
- Mantenimiento de bajo costo sin consumo de energía y no se necesita personal calificado.
- Desaparición de malos olores y fangos.
- Depuración más allá de los parámetros permitidos de vertidos, produciendo una calidad muy alta.
- Integración total en el paisaje.
- Posibilidad de depuración directa en aguas libres.
- Posibilidad de reuso en regadío.
- La cosecha de la materia vegetal no destruye el sistema como en el caso de los que utilizan plantas enraizadas.
- Es más efectivo que otros filtros verdes, dado que todo el volumen del agua residual circula por la esponja de raíces (la absorción diaria puede alcanzar entre los 0,5 – 4,66 g N/m² y los 0,6 – 0,8 g P/m²).
- No genera ruidos y el impacto visual es mínimo.
- Produce una gran cantidad de biomasa. [Explicado en el apartado 4.4.].
- No hay límite en la depuración de aguas para grandes poblaciones, si integramos conceptos y generamos espacios libres asociados como parques públicos a otros usos capaces en su espacio de depurar las aguas.

4.4.5.2. Desventajas

- Limitación de poder utilizar el sistema solo en los climas en que estas plantas se desarrollen con normalidad, aunque exceptuando los climas extremadamente fríos, estas plantas están distribuidas en todo el planeta.

4.4.6. Aplicaciones en fitodepuración⁷⁵

Cuando las condiciones del medio natural son muy favorables, es decir, que el medio no está alterado y no hay contaminación, la *T. latifolia* compite exitosamente contra las otras especies, la *T. angustifolia* y la *T. dominguensis*, que suelen restringirse a medios más alterados y salinos. En condiciones de aguas de baja calidad, si hubiera la coexistencia de la *T. latifolia* con la *T. dominguensis*, esta segunda iría poco a poco desplazando a la *T. latifolia*, ya que desarrolla mayor talla y tiene menor exigencia de calidad de agua. En

⁷⁴ Macrofitas S.L. Tecnología del agua española para la ecología del planeta. Madrid, 2010.

⁷⁵ Departamento técnico, Macrofitas S.L. Pliego de prescripciones técnicas sobre cultivo y suministro de plantas helófitas utilizadas para tratamiento de aguas mediante la tecnología Hidrolution-FMF. Madrid, Octubre, 2012.

España los estudiosos del tema señalan que en los humedales naturales la *T. dominguensis* está desplazando a la *T. latifolia*, como consecuencia de la baja calidad de las aguas.

Con respecto a la *T. angustifolia*, se indica que el área natural de distribución es de temperaturas más frescas que las de los hábitats de las otras dos especies. La aplicabilidad de las enneas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas es muy amplia. Pueden aplicarse en sistemas de flujo superficial, aprovechando su condición de helófito, en flujo sub-superficial, como plantas arraigadas en la grava, y en sistemas acuáticos en flotación inducida, optimizando el papel filtrante de su sistema radicular.

Los resultados de diferentes experiencias indican que, en comparación con otras plantas utilizadas para tratamiento de aguas (*Scirpus validus* y *Juncos effusus*, entre otras), las enneas son las plantas más eficaces para la fitodepuración. Pueden ser utilizadas para tratamiento secundario (remoción de materia orgánica) y terciario (remoción de N y P) en climas templados. Su eficacia dependerá de los factores condicionantes del crecimiento de las plantas básicamente temperatura y radiación. Existen numerosos trabajos sobre la productividad de las enneas, en medios naturales y en humedales artificiales, que documentan que es una especie altamente productiva. En experiencias de fitodepuración se indica una productividad de 13 kg de biomasa total por m² y año (aérea y sumergida). Las extracciones se estiman en función de los contenidos de nutrientes en las distintas fracciones de la planta; pueden llegar a ser del orden de 180g N/m² y 27g P/ m².

4.4.7. Comparación de dos tipos de tratamiento de agua residual

En la siguiente Tabla 2⁷⁶ se expone la comparación entre una EDAR⁷⁷ convencional de fangos activos, y un sistema con depuración de filtro de macrofitas en flotación.⁷⁸,

⁷⁶ La Tabla que a continuación se muestra se le ha variado el tamaño de letra para que pueda entrar completa en la hoja

⁷⁷ Estaciones depuradoras de aguas residuales

⁷⁸ Hidrosun Ingeniería S.L. Sistema de filtros de macrofitas en flotación. Madrid, Nd.

Tabla 2: Comparación de dos tipos de tratamiento de agua residual

Parámetros	EDAR convencional	Depuración con macrofitas en flotación
Consumo Energético	<ul style="list-style-type: none"> - Gran consumo energético continuado en todos los procesos de depuración, con grandes costos en energía eléctrica asociado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Consumo casi nulo (energía solar)- - Para conseguir el humedal natural en todo el filtro de macrofitas, solo necesitamos una pequeña recirculación del afluente de salida a la entrada del agua residual, auto-alimentable con placa solar o sistema eólico.
Recursos Humanos	<ul style="list-style-type: none"> - Gran número de personal especializado y (cualificado técnicamente) y no cualificado en la construcción y sobre todo en el mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Por ser tecnología de bajo coste constructivo (importes inferiores, llegando hasta 10 veces menos). - Mantenimiento realizado por un; jardinero, agricultor, con conocimientos básicos de agronomía.
Instalaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de suelo industrial y servicios. - Conjuntos, equipos y edificios con estructuras complejas y de gran coste arquitectónico y económico. - Sistemas de reducida vida útil. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducidas la excavación e impermeabilización de canales o lagos. - Sistema de re-bombeo básico, apoyado por la energía solar o eólica. - Muchos años de funcionamiento sin colmatación.
Tecnológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Procesos físicos, químicos y biológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso natural. - Mejor sistema en la remoción de materia sólida extraíble que no pueden conseguir con los procesos físicos y biológicos actuales de la EDAR (lo hacen las plantas)
Medio Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> - Aguas sin tratamientos terciarios. - Niveles de vertido aproximándose a la legislación, en los mejores casos. - Malos olores. - Generación de fangos. - Necesidad de desinfección de aguas, clara. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tratamiento en aguas libres (lagos), primario, secundario y terciario. No lo pueden realizar las depuradoras actuales que no utilicen macrofitas. - Niveles de depuración comparables a manantiales, con vida de protozoos, caracoles, insectos, peces, etc. - Aguas sin organismos patógenos con posibilidad de alcanzar aguas potables. - Acorde con el protocolo Kyoto. - Integración total en el paisaje. - No se producen olores, ni fangos. - Sistema vivo y natural que se auto-depura. - Generatriz de ecosistema acuático.
Capacidad	<ul style="list-style-type: none"> - Capaces de depurar medianos a grandes volúmenes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Depuración desde pequeñas poblaciones, hasta grandes volúmenes.
Costes Totales	<ul style="list-style-type: none"> - Elevados en: construcción, mantenimiento (energéticos y mano de obra). 	<ul style="list-style-type: none"> - Entre 10 y 6 veces menores en construcción frente a EDAR convencional. - Unas 100 veces menores en mantenimiento frente a EDAR convencional.

Capítulo 5

Optimización del tratamiento de aguas residuales de uso doméstico, en el sistema de lagunas de oxidación de la Universidad de Piura

Un dato utilizado generalmente por algunos estudios sociológicos es que, el acelerado desarrollo industrial, unido al incremento de la población ha originado una demanda de agua que apunta a la insostenibilidad.

En realidad esta afirmación resulta demasiado simple y requeriría considerar otras causas adicionales, como es el caso del crecimiento desordenado de las ciudades en muchos países en vías de desarrollo, como consecuencia de la falta de un planeamiento urbano actualizado. Por otra parte, la concentración del poder ejecutivo efectivo en uno o dos núcleos urbanos por país origina fuertes inmigraciones asimétricas, desbalanceando servicios de todo tipo. Habría que señalar también una deficiente gestión del agua a todo nivel en los siguientes aspectos: real disponibilidad del agua, costo irreal del agua, uso ineficiente, calidad del agua, etc. Las consecuencias de éstas y otras causas, derivadas de un grave desorden, distorsionan la realidad induciendo soluciones fáciles, que no resuelven los problemas. Por el contrario, éstos se agudizan en las poblaciones económicamente más débiles que son las que realmente sufren la falta de agua en calidad y cantidad y la precariedad de los servicios de saneamiento.

Se llega a señalar que solo un 1% del agua del planeta es accesible para el consumo humano, y la mitad está contaminada. Este tipo de estadísticas sin sustento a la vista, suelen ser sospechosas; sin embargo, sin entrar en precisiones numéricas, puede observarse que al menos una gran proporción de los ríos de la costa peruana presentan una contaminación por encima de los límites máximos permisibles.

Debido a su costo elevado, la falta de dedicación y capacidad logística y la ausencia de espacios adecuados para la implementación de las plantas de tratamiento, en nuestro país las EPS no han logrado desarrollar sistemas sostenibles en el proceso de tratamiento de aguas residuales que permitan reutilizar sin riesgos el agua. Uno de los principales problemas que afrontan los sistemas de tratamiento convencionales es lograr un mantenimiento de sus instalaciones con la frecuencia adecuada, lo que lleva al incremento indebido de la colmatación de los lechos, reduciendo los tiempos de retención. De otro lado la carencia de superficies adicionales para su utilización en nuevas áreas de tratamiento, se traduce en una sobrecarga adicional de los sistemas existentes.

En este capítulo, se plantea la optimización del tratamiento de aguas residuales de uso doméstico, en el sistema de lagunas de oxidación de la Universidad de Piura, a través de un procedimiento de fitodepuración, con el sistema filtro de macrofitas en flotación (*typha dominguensis*). Se plantea la instalación de las *typhas* para un procedimiento de depuración, cuyas pautas se basan en el estudio de la literatura existente, pero sin excusar las comprobaciones necesarias, una vez el procedimiento quede instalado¹.

5.1.Procedimiento de instalación

El estudio tiene entre sus principales objetivos:

- Introducir una forma de tratamiento más flexible que pueda hacer frente a sobrecargas imprevistas, minimizando a la vez la colmatación de los lechos. Ello se debe lograr mediante la inclusión en el tratamiento de la macrofita *typha dominguensis* mantenida en flotación.
- Permitir asegurar la facilidad del paso del agua reduciendo la colmatación del lecho y eliminando los riesgos de contaminación en el proceso de purificación.
- Aplicar lo señalado para optimizar el funcionamiento de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura. Se ha elegido el actual sistema de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de Piura (vid. capítulo 3) por las ventajas que representa en cuanto a su calidad de diseño y la cercanía a los correspondientes laboratorios.

Una vez instalado el sistema, el análisis de los resultados, deberá establecer aspectos como:

- La capacidad de adaptación de las macrofitas al clima local.
- La capacidad de transporte de oxígeno desde las hojas hasta la raíz.
- La capacidad de filtraje de la materia orgánica.
- La capacidad de captación de ciertos metales.
- La tolerancia a su resistencia a insectos y enfermedades y su facilidad de manejo.

Además de los anteriores, otros puntos que la literatura señala comparativamente importantes y que deberán también ser comprobados son:

- Una implementación relativamente sencilla.
- Unos resultados comparativamente ventajosos.
- Una integración agradable al paisaje, con ausencia de olores desagradables.
- Una fácil replicabilidad.

Partiendo de un pie forzado consistente en la forma y disposición de las lagunas (primaria y secundaria), y sus sistemas de ingreso, intercambio y salida de los efluentes, el procedimiento que se describe a continuación trata de adaptarse a esta situación y supone una optimización indudable al tratamiento, que debe ser demostrada como resultado de su puesta a punto.

El objetivo de la presente propuesta es diseñar un prototipo de depuradora sostenible que permita comparar entre los rendimientos de un lagunaje convencional y los de un lagunaje

¹ De momento se están haciendo gestiones para conseguir los fondos necesarios para realizar la instalación en las lagunas de la Universidad de Piura.

mejorado con la instalación del sistema macrofitas flotantes. Para el emplazamiento del prototipo se utilizará una de las lagunas ya existentes dentro del campus de la Universidad de Piura. Se pueden adaptar partes de las mismas y generar un estudio comparativo de situaciones. El sistema de macrofitas flotantes dota al agua residual de un sistema de oxidación activa, que permite que los fangos fermentados o parcialmente digeridos sean oxidados completamente. Es por ello, que el sistema de macrofitas flotantes es una solución sostenible como infraestructura depuradora, permitiendo que la vida útil de la instalación no se agote. La principal consecuencia de ello es económica, un importante ahorro para la “propiedad” de la depuradora.

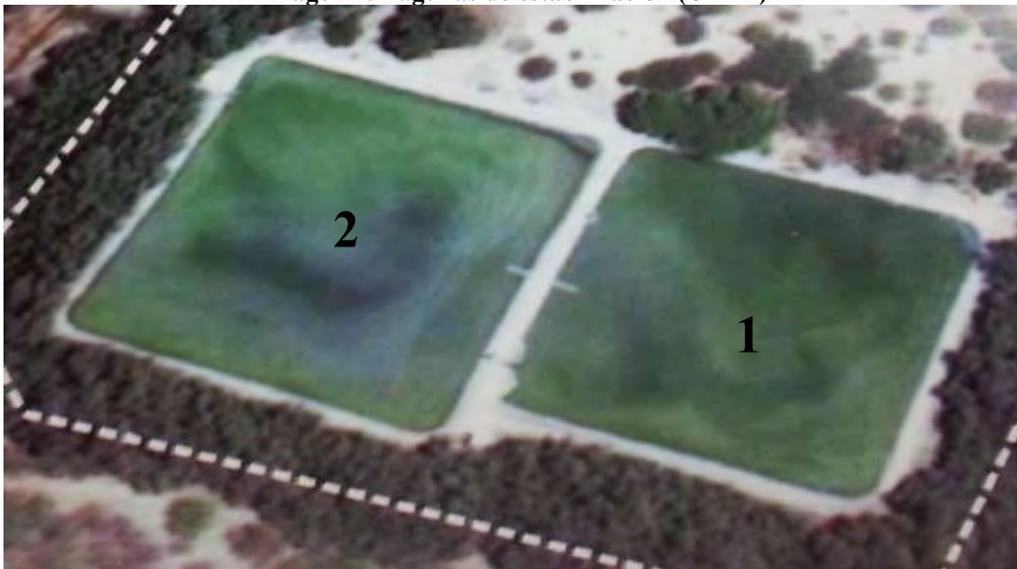
Los principales aspectos a dilucidar por medio del futuro proyecto prototipo serán:

- Comparar los parámetros actuales con los que se obtengan del resultado de instalar en la laguna secundaria el procedimiento de las macrofitas flotantes.
- Determinar la eficacia en la disipación de fangos por la laguna implantada con las macrofitas y compararla con los fangos obtenidos en el último mantenimiento de la laguna.
- Determinar otros aspectos ambientales que puedan suponer una mejora como por ejemplo, la eliminación de olores producidos por las acumulaciones de fangos en condiciones anaeróbicas.
- Evaluar la respuesta ante cambios de carga imprevistos.
- Poder garantizar la adaptabilidad del procedimiento, en otros sistemas similares existentes en la región.

5.2.Instalaciones

El sistema de tratamiento de aguas residuales de la UDEP (vid capítulo 3), consta de dos lagunas (Imagen 1); una laguna de tratamiento primario-1- (anaerobia/facultativa) y la segunda de tratamiento secundario -2- (facultativa/aerobia).

Imagen 1: Lagunas de estabilización (UDEP)



1.2.1. Laguna Primaria

La laguna primaria se utilizará como sedimentador (Imagen 2). Ello es importante, puesto que se traduce en la sedimentación de lodos con la correspondiente disminución de materia orgánica y de microorganismos asociados a ella.

Imagen 2: Laguna primaria de la UDEP (futuro sedimentador)



5.2.2. Laguna Secundaria

La laguna secundaria tendrá un papel de filtraje y de purificación de organismos patógenos, en base a la instalación de las macrofitas flotantes excelentes productoras de oxígeno, dependiendo del financiamiento obtenido, comprenderá entre un 40 y un 100% del área de espejo de agua hacia su parte final.

5.2.3. Homogenización

En las instalaciones actuales el agua, después de atravesar el sistema de desarenación-medición, ingresa a la laguna primaria por la esquina NE, hace un recorrido con una dirección predominante hacia la esquina SO penetra en la laguna secundaria por su esquina SE cruza hacia la esquina NO. Este recorrido en zigzag deja áreas de ambas superficies en cortocircuito, para eliminar este defecto se realizará la homogenización de la entrada y salida de las dos lagunas, de manera que el agua se distribuya uniformemente y manteniendo una velocidad conveniente, ajustándose al tiempo de retención.

Esto se logrará instalando tubos uniformemente distribuidos en la interconexión y salida del agua. En el caso de la segunda laguna se recogerá el efluente mediante un tubo de PVC para evitar daños en la estructura.

Las diferencias debidas a sobrecargas imprevistas se controlarán mediante las tres compuertas instaladas en la actualidad.

5.2.4. Cálculos

Para calcular la cantidad necesaria de tubos en la interconexión y salida, se deben considerar los caudales de ingreso y salida y las características de los mismos:

Ecuación de la energía:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma \cdot g} + h_f + h_e$$

Donde Z_1 y Z_2 , son las alturas de los puntos 1 (entrada al tubo) y 2 (nivel del agua de la segunda laguna); P_1 es la presión en la entrada y P_2 es la presión de salida. Los valores de h_f y h_e , son las pérdidas por fricción y entrada en la tubería, respectivamente.

Pérdida por fricción:

$$h_f = \frac{f \cdot L \cdot V^2}{2gD}$$

Pérdida de la entrada:

$$h_e = 0,5 * \frac{V^2}{2g}$$

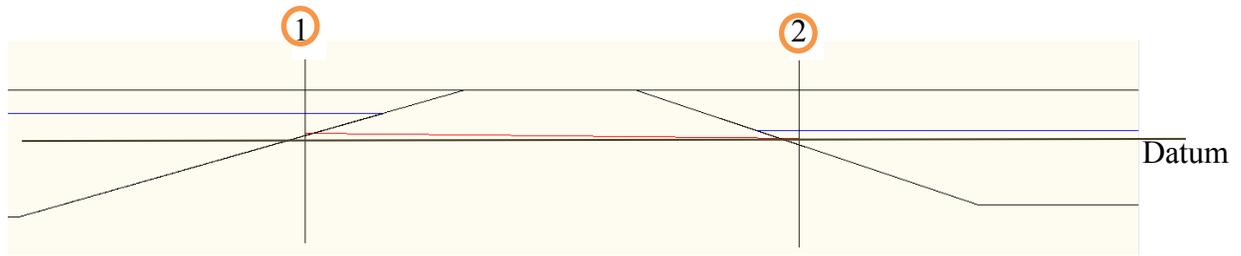
En el caso del punto 1; Z_1 es la altura desde el datum² hasta el comienzo de la tubería en la laguna primaria y $h_1 = \frac{P_1}{\gamma \cdot g}$ es la profundidad del inicio de la tubería.

De la misma manera en el punto 2; Z_2 es la altura desde el datum hasta el comienzo de la tubería en la laguna primaria, que en este caso sería cero y $h_2 = \frac{P_2}{\gamma \cdot g}$ es profundidad del extremo de la tubería (Imagen 3).

$$\begin{array}{l} Z_1 = 0,084 \text{ m} \quad h_1 = 0,357 \text{ m} \\ Z_2 = 0 \text{ m} \quad h_2 = 0,14 \text{ m} \\ Z_1 + h_1 = H_1 \qquad \qquad \qquad Z_2 + h_2 = H_2 \end{array}$$

Imagen 3: Explicación de los puntos a tomar

² Plano horizontal de referencia



Las ecuaciones que se utilizan para poder hacer la iteración serán:

Ecuación de Colebrook-White:
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{K}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}}\right)$$

Ecuación de Barr:
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{K}{3,7D} + \frac{5,1286}{Re^{0,89}}\right)$$

Ecuación de Reynolds:
$$Re = \rho \cdot \frac{v \cdot D}{\mu}$$

De los datos que tenemos tomamos un aproximado de los valores que afectan al agua residual (μ , ρ , k), y tomamos los valores del agua a $T=25^\circ\text{C}$.

$$\mu_{25^\circ\text{C}} = 0,89 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\rho_{25^\circ\text{C}} = 997,13 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 0,0015$$

Despejando la velocidad de la ecuación de la energía, tenemos:

1:

$$v = \sqrt{\frac{(H_1 - H_2) \cdot 2g}{\frac{f \cdot L}{D} + 0,5}}$$

Y para poder iterar utilizaremos primero la ecuación de Colebrook-White:

2:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{K}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}}\right)$$

Después de despejar la ecuación 1, procedemos a ingresar los valores, tomando como punto de inicio para la iteración el valor para $f = 0,02$; el diámetro de la tubería $D = 2'' = 5,08 \text{ cm}$ y la longitud de la misma $L = 8,66 \text{ m}$. Cuando se pasa de la ecuación (1) a la (2), se hace

uso de la ecuación de Reynolds con los valores tomados. Se iteran los valores de “f” y “v” (1) y (2), e iteramos hasta hallar el valor de la velocidad de interconexión:

f=0,02 → (1) → v=1,226 m/s → (2) → f=0,0195 → (1) → v=1,24 m/s → (2) → f=0,0194 → (1) → v=1,242 m/s → (2) → f=0,0194 → (1) → v=1,23 m/s → (2) → f=0,02 → (1) → v=1,2265 m/s → **v=1,23 m/s**

Con la velocidad hallada, se determina el caudal, en una tubería con diámetro 2”:

$$Q = v \cdot A$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$Q = 1,2265 \times \frac{\pi \cdot 0,0508^2}{4} = 2,4856 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 2,49 \text{ L/s}$$

Con el caudal de entrada Q=12,84 L/s, podemos hallar la cantidad de tubos de 2” que se necesitan:

$$\frac{12,84}{2,49} = 5,16 \text{ tubos}$$

Para ser conservadores pondríamos 6 tubos, y para estar seguros de los valores que estamos hallando, probamos con la siguiente ecuación, la ecuación de Barr, que también utiliza la ecuación de Reynolds donde también utilizamos los valores anteriormente dichos:

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = -2 \log\left(\frac{K}{3,7D} + \frac{5,1286}{Re^{0,89}}\right)$$

f=0,02 → (1) → v=1,241 m/s → (2) → f=0,0194 → (1) → v=1,244 m/s → (2) → f=0,0194 → (1) → v=1,241 m/s → (2) → f=0,0196 → (1) → v=1,24 m/s → (2) → f=0,02 → (1) → v=1,2284 m/s → **v=1,23 m/s**

$$Q = v \cdot A$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$Q = 1,23 \times \frac{\pi \cdot 0,0508^2}{4} = 2,489 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 2,49 \text{ L/s}$$

Con el caudal de entrada Q=12,84 L/s, podemos hallar la cantidad de tubos de 2” que se necesitan:

$$\frac{12,84}{2,49} = 5,16 \text{ tubos}$$

De la misma manera, para ser conservador pondremos 6 tubos y como en los dos casos sale el mismo dato, elegimos 6 tubos a colocar.

Cabe indicar que se debe colocar protecciones al talud para contrarrestar la erosión (babero), consistente en una plancha de concreto. En la entrada de la tubería en la laguna primaria un babero de 20x20 cm², en la salida de la tubería (interconexión) un babero de 20x30 cm², en la salida del efluente (laguna secundaria) que también se tendría que colocar otro babero de 20x20 cm² y en la salida hacia el canal de 20x30 cm².

Para la homogenización mencionada, se procederá a colocar tuberías entre la laguna primaria y la secundaria. De tal manera que haya un flujo libre del agua a tratar, se pondrán 6 tubos de PVC de 2" de aproximadamente 8,66 m a lo largo del paso entre las lagunas (Imagen 4 e Imagen 5).

Imagen 4: Vista transversal de la interconexión

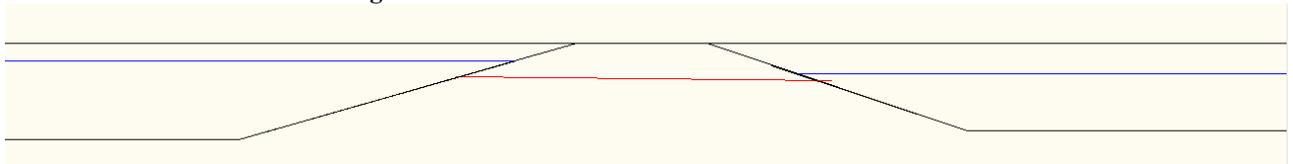
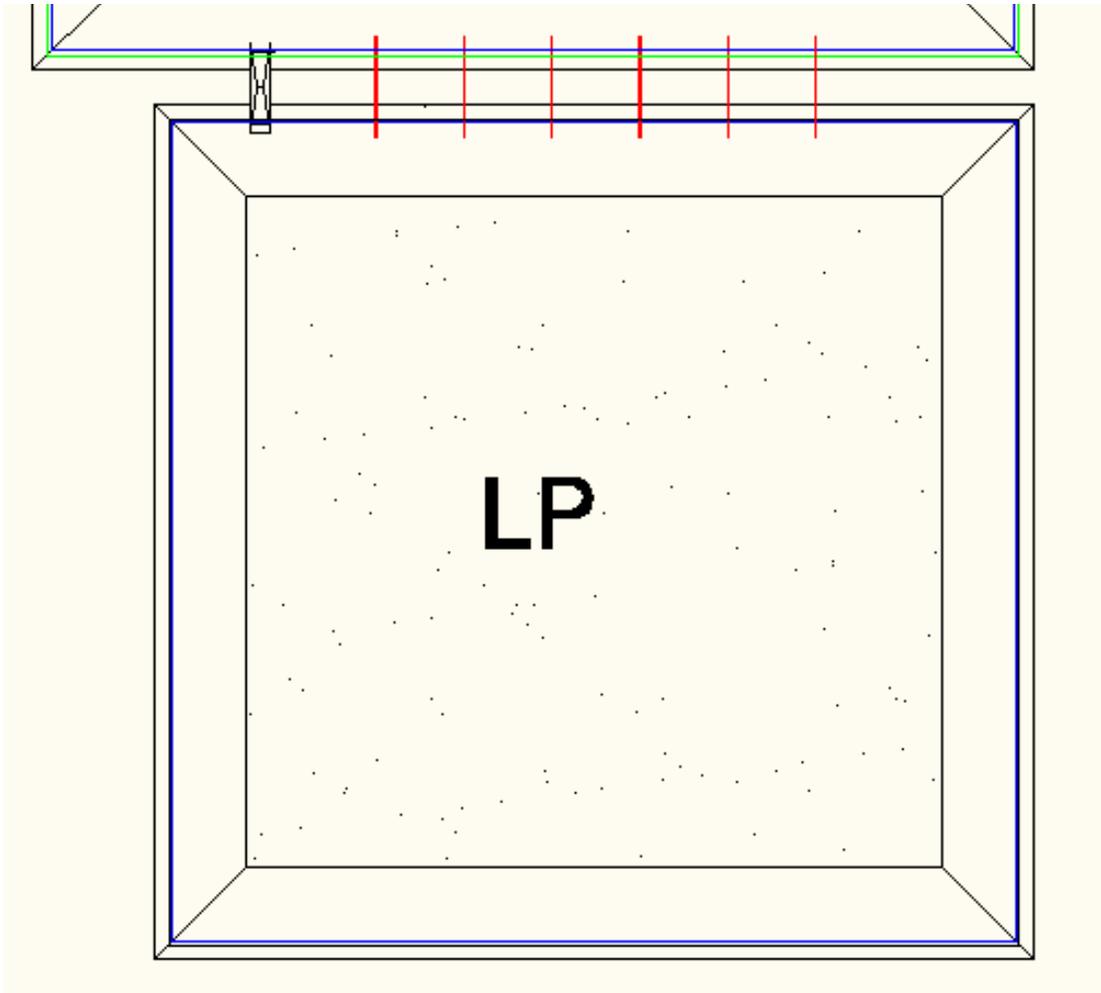


Imagen 5: Paso de laguna primaria a secundaria



De la misma manera, se colocarán tubos de PVC 2" de 1,97 m en el efluente de la laguna secundaria, y para hallar la cantidad de tubos que se utilizarán, se procede a utilizar las mismas ecuaciones que se utilizaron anteriormente.

Primero utilizaremos la ecuación de Colebrook-White, con los mismos valores $D=2'' = 5,08$ cm; $f=0,02$ y con la variación de la longitud $L=1,97$ m

$f=0,02 \rightarrow (1) \rightarrow v=2,03$ m/s $\rightarrow (2) \rightarrow f=0,0175 \rightarrow (1) \rightarrow v=2,112$ m/s $\rightarrow (2) \rightarrow f=0,0174$
 $\rightarrow (1) \rightarrow v=2,1168$ m/s $\rightarrow (2) \rightarrow f=0,0174 \rightarrow (1) \rightarrow v=2,117$ m/s $\rightarrow (2) \rightarrow f=0,0164 \rightarrow$
 $(1) \rightarrow v=2,151$ m/s $\rightarrow f=0,016 \rightarrow (1) \rightarrow v=2,1678$ m/s **$v=2,17$ m/s**

Con la velocidad hallada, se determina el caudal, en una tubería con diámetro 2":

$$Q = v \cdot A$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$Q = 2,17x \frac{\pi \cdot 0,0508^2}{4} = 4,394x10^{-3} m^3/s$$

$$Q = 4,39 L/s$$

Con el caudal de entrada Q=12,84 L/s, podemos hallar la cantidad de tubos de 2" que se necesitan:

$$\frac{12,84}{4,39} = 2,92 \text{ tubos}$$

En este caso se utilizarían 3 tubos de 2".

Ahora la ecuación de Barr, con los mismos valores D=2" = 5,08 cm; f= 0,02 y con la variación de la longitud L= 1,97 m.

f=0,02 → (1) → v=2,03 m/s → (2) → f=0,0174 → (1) → v=2,12 m/s → (2) → f=0,0172 → (1) → v=2,123 m/s → (2) → f=0,0172 → (1) → v=2,126 m/s → (2) → f=0,017 → (1) → v=2,131 m/s → **v=2,13 m/s**

Con la velocidad hallada, se determina el caudal, en una tubería con diámetro 2":

$$Q = v \cdot A$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$Q = 2,13x \frac{\pi \cdot 0,0508^2}{4} = 4,319x10^{-3} m^3/s$$

$$Q = 4,32 L/s$$

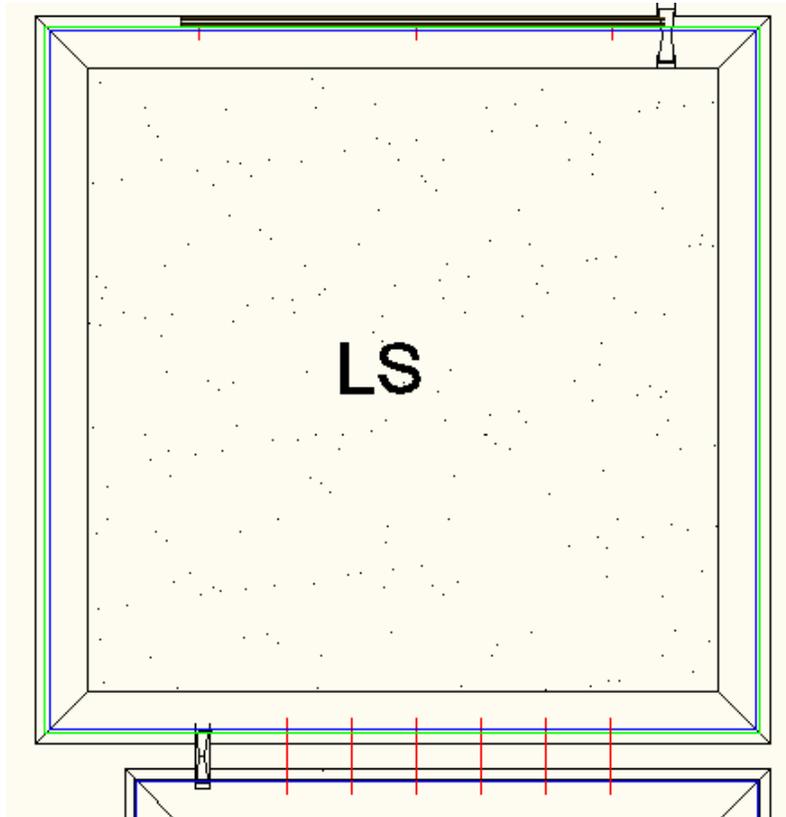
Con el caudal de entrada Q=12,84 L/s, podemos hallar la cantidad de tubos de 2" que se necesitan:

$$\frac{12,84}{4,32} = 2,97 \text{ tubos}$$

De la misma manera con esta ecuación, serían 3 tubos de 2".

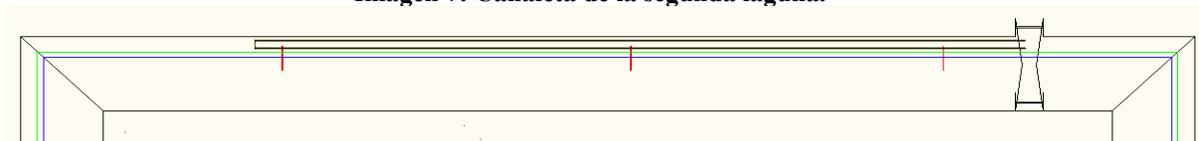
En conclusión, en el efluente de la laguna secundaria se colocarán 3 tubos de 2", con su respectiva protección al talud para contrarrestar la erosión (babero). Además, se construirá una canaleta al final de las tuberías, para la recolección del efluente, y poder sacar los futuros muestreos (Imagen 6).

Imagen 6: Tubería de efluente, y canaleta.



La Imagen 7, muestra un acercamiento de la mejora que se hará en la segunda laguna con las tuberías de salida y arreglo de la compuerta.

Imagen 7: Canaleta de la segunda laguna.



Con una inclinación entre 1 y 1,5% en la interconexión de lagunas (Tabla 1), en la laguna secundaria, en el 40% final del espejo de agua total se colocarán las plantas (*typha dominguensis*). Para obtener el mejor resultado se colocarán un promedio de 13,5 plantas/m², de esa manera se espera que el sistema tenga un resultado óptimo (Imagen 8³ e Imagen 9).

³ Macrofitas S.L. Tecnología del agua española para la ecología del planeta. Madrid, 2010.

Tabla 1: Datos de tuberías a instalar

	Cantidad	Longitud	mL
Intersección tuberías 2"	6	8,66	51,96
Efluente tuberías 2"	3	1,97	5,91
	TOTAL		57,87

Imagen 8: Plantas colocadas en plástico hexagonal



Imagen 9: Planta lista para colocación⁴.



Las plantas tipo *typha*, se producirán en la Universidad de Piura, serán *typha dominguensis* extraídas las semillas del humedal artificial más cercano que es la Represa “Los Ejidos”, y seguiremos el procedimiento del “Pliego de prescripciones técnicas sobre cultivo y suministro de plantas helófitas utilizadas para el tratamiento de aguas mediante la tecnología Hidrolution-FMF®” (Imagen 10).

Imagen 10: Sistema FMF, listo para empezar a trabajar⁵

⁴ Macrofitas S.L. Tecnología del agua española para la ecología del planeta. Madrid, 2010.

⁵ Grupo Valoralia. Extraído de YOUTUBE 01 de Agosto de 2013, 09:58. [Archivo de video]. Video publicado en <http://www.youtube.com/watch?v=GGNUNiJkeBw>.



5.3.Reuso y muestras

El agua tratada, se reutilizará para seguir con la reforestación del bosque seco del campus, las 11,6 ha dedicadas para tal fin. Además, se sacarán muestras por el LIS⁶ del agua que ingresa afluyente a la primera laguna, de la interconexión entre la primera y segunda laguna, y el efluente de la segunda laguna; de la misma manera se extraerán muestras de las raíces, hojas y tallos de las plantas antes y después de su colocación para saber si hay variación de dichas partes a causa del agua residual.

Se harán curvas de calidad para hacer las respectivas comparaciones, de las diferentes muestras que se realizarán cada 15 o 20 días.

⁶ Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la UDEP.

5.4.Presupuesto

El presupuesto de las obras y compras de plásticos especiales para el proyecto, se detalla en el siguiente cuadro (Tabla 2):

Tabla 2: presupuesto del futuro proyecto

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Parcial	TOTAL
Pases Conectores entre la Laguna Primaria (LP) y la Laguna Secundaria (LS)					8941,99
Excavación a mano en terreno compactado	m3	211,21	24	5069,14	
Suministro y colocación de tubería PVC 2"	ml	51,96	16	831,36	
Relleno Compactado con material propio	m3	211,21	14.4	3041,49	
Pases Conectores entre la Laguna Secundaria (LS) y Canal de evacuación (CE)					11014,16
Excavación a mano en terreno compactado	m3	126,99	24	3047,76	
Suministro y colocación de tubería PVC 2"	ml	5,91	16	94,56	
Relleno Compactado con material propio	m3	126,99	16	2031,84	
Excavación manual para canal de evacuación	ml	80	48	3840	
Suministro y Colocación de válvulas	Est	1	2000	2000	
Mejora de salida de agua de la Laguna Secundaria					3200
Mejoramiento de Salida de Laguna Secundaria 1	Est	1	3200	3200	
HIDROLUTION					30776,5
Insumos (plásticos especiales para sostener las plantas)	S/.			30776,5	
Costo Directo	S/.			330,932.65	

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones generales

1. El agua residual, dado su valor intrínseco, debe recuperarse al máximo posible para ser reutilizada. El ciclo hidrológico cumple naturalmente esta función pero se dan tres situaciones que hacen imprescindible el actuar artificialmente para su purificación:
 - a. La velocidad de contaminación es mayor que la velocidad de descontaminación a través del ciclo hidrológico;
 - b. La intensidad de contaminación va siendo cada vez mayor conforme las aguas contaminadas van discurriendo por la cuenca y los focos contaminantes se multiplican e intensifican, de modo que, no solo en su fase final en el mar sino en el mismo proceso de contaminación a lo largo de la cuenca, se alcanzan estados altamente perjudiciales para la salud;
 - c. Una vez incorporadas al mar, las posibilidades de intervención son altamente difíciles y costosas, con graves consecuencias para las actividades de pesca, la maricultura, las poblaciones aledañas y el turismo.
2. El objetivo principal de un tratamiento de agua residual doméstica es eliminar los diferentes contaminantes hasta por debajo de los límites máximos permisibles, de acuerdo a la normativa existente y a las condiciones señaladas para su reuso específico por la normativa vigente (vid acápite **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).
3. Paralelamente a la operación de tratamiento del agua residual doméstica, en lagunas de estabilización se producen, por decantación, fangos o *lodos* con una proporción de materia orgánica significativa y un fuerte contenido de bacterias y virus patógenos. Consecuentemente, un objetivo secundario pero paralelo al principal es disponer adecuadamente de los *lodos* para utilizarlos con diferentes propósitos relacionados con su condición orgánica. En efecto, el tratamiento de estos lodos puede dar lugar a la producción de material fertilizante, siempre de gran utilidad pero especialmente en regiones costeras como la de Piura cuyos suelos, en gran proporción, sedimentarios eólicos compuestos de arena fina, carecen de capacidad nutritiva para las plantas.

4. Las tareas fundamentales que deben cumplir las plantas de tratamiento de agua residual doméstica son¹:
 - a. Separación de sustancias particuladas.
 - b. Extracción o destrucción de bacterias y virus patógenos.
5. Todos los métodos de tratamiento de agua residual se basan en procesos físicos, químicos y biológicos, aportando cada uno de ellos su propio rendimiento; la pérdida de eficiencia no es de esperar que se deba al tipo de proceso en sí, si no a defectos en el diseño, operación, mantenimiento, o en la presencia de sobrecargas no previstas. Y es usual que, la eficiencia disminuya por una mala operación, por un mantenimiento inadecuado, u operarios ausentes y poco preparados. La mayoría de los sistemas de lagunas de estabilización operan mal y ello debido a las razones expresadas.
6. El diseño de un sistema de tratamiento de agua residual mediante lagunas de estabilización determina la capacidad y la eficiencia del mismo. Por ejemplo, debe analizarse el crecimiento poblacional al mediano y largo plazo, y prever las áreas necesarias para la ampliación de los sistemas. Además de ello, es necesario conocer también la calidad de los afluentes y el posible cuerpo receptor final, considerando las condiciones más desfavorables y el grado de tratamiento que se debe alcanzar de acuerdo al reuso establecido y a las normas vigentes.
7. Es importante tener un pretratamiento eficaz, que retenga sólidos gruesos, grasas y material sedimentable, ya que su presencia en el efluente podrían alterar el tratamiento total. En el caso de la zona de desbaste de las lagunas de la Universidad de Piura, se tendría que realizar un mejoramiento mínimo, para que las rejas del primer canal, antes de llegar a la laguna primaria, realicen debidamente su tarea de retención.
8. Los tratamientos terciarios de desinfección como la cloración, los sistemas de ozono o el UV, si bien ayudan a eliminar virus y bacterias también pueden generar males, como por ejemplo; en la cloración, el cloro en sí es tóxico para la vida acuática, y el agua tratada con este elemento tiene que ser sometida a de-cloración antes de disponerla a cursos de agua natural²; la desinfección por ozono, es costosa y se utiliza si hay peligro de infección; sin embargo, puede generar bromato, que es un agente cancerígeno que puede dañar severamente la salud del ser humano³; la desinfección por rayos UV (ultravioleta), debe planearse de manera correcta para

¹ Glynn, J & Heinke, G. Ingeniería Ambiental. 2ª ed. México, 1999.

² Depuración de aguas residuales. Extraído 15/08/2013, a las 10:30.
<http://www2.cbm.uam.es/jalopez/personal/SeminariosVarios/ERARtexto.htm>

³ Dawes, A. Desventajas del tratamiento de agua con ozono. http://www.ehowenespanol.com/desventajas-del-tratamiento-agua-ozono-lista_75517/. Estados Unidos, 2005.

que sea eficiente, manteniendo, por ejemplo, las lámparas limpias, el hacer circular el agua a través de ellas no es aconsejable⁴.

Conclusiones específicas: lagunas de la Universidad de Piura (capítulo 3)

9. La laguna primaria del campus, que se comporta como facultativa/anaerobia, dependiendo de su nivel. Es la que produce la mayor cantidad de fangos con baja producción de oxígeno y, alta de otros gases no oxigenados.
10. La laguna secundaria, fase final del tratamiento, se caracteriza por tener una zona aerobia significativa en la proximidad de la superficie, mientras que se comporta como anaerobia en la región yuxtapuesta al lecho.
11. El diseño de las lagunas se planteó para 20 años de operación continua con un promedio de afluencia de unos 13 L/s hacia el final del mismo; sin embargo ese gasto fue superado, con la paralela pérdida de rendimiento, concurriendo en ello dos causas principales:
 - a. La entrada sin control de otras urbanizaciones;
 - b. Una consecuente sedimentación de *lodos* limitando la capacidad de las lagunas.

Conclusiones específicas respecto a la bioremediación (Capítulo 4)

12. El inconveniente señalado en la conclusión anterior ha impulsado el investigar una solución eficaz que permita hacer flexible el diseño ante variaciones de carga, a la vez que suponga una optimización de la operación de las lagunas sin modificar básicamente las dimensiones actuales.
13. Los humedales artificiales, son métodos efectivos y menos costosos. Su consumo energético es relativamente bajo ya que se utiliza energía solar.
14. Los humedales imitan a los naturales son zonas encharcadas donde existe vegetación acuática (macrofitas) perfectamente adaptada, que degrada, absorbe y asimila en sus tejidos los elementos contaminantes. La retención de nutrientes que se realiza en estos ecosistemas, es lo que los tipifica como uno de los ecosistemas más productivos de la biósfera.
15. La fitodepuración referida a la depuración natural de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrofitas) ha sido un procedimiento clásico de recuperación de la calidad del agua.

⁴ Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con luz ultravioleta. United States Environmental Protection Agency. http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs-99-064.pdf

16. Por sus características, los humedales artificiales (*Constructed wetlands*) pueden jugar un papel de gran importancia en la depuración de AR:
- a. Logro de niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.
 - b. Aeración a través del sistema radicular facilitando oxígeno a los microorganismos que viven en la rizosfera.
 - c. Absorción de nutrientes (N y P).
 - d. Eliminación de contaminantes asimilándolos directamente en sus tejidos.
 - e. Filtración de los sólidos a través del entramado que forma su sistema radicular.
 - f. Adaptación a condiciones de entrada cambiantes.
17. El oxígeno necesario para estos procesos es suministrado por las propias plantas, produciéndolo por fotosíntesis, o tomándolo del aire inyectándolo hasta la zona radicular.
18. De entre los diversos humedales artificiales existentes, diferenciados por el enraizamiento y el tipo de macrofitas utilizado, el sistema elegido es el que mantiene las plantas flotantes. La ventaja de tener siempre el sistema radicular bañado por el agua residual sin posibilidad de colmatación, se une la ventaja de utilizar plantas macrofitas de gran porte que pueden producir una gran cantidad de biomasa con excelente producción y captación de oxígeno.
19. El sistema de flotación mantiene el sistema radicular permanentemente sumergido y el sistema emergente, con excelente producción y captación de oxígeno.
20. El corazón del sistema de flotación está construido por un tapiz flotante de vegetación, formado sobre la superficie de un canal o laguna, cuyos elementos básicos son las plantas⁵ que van a tener sumergido su sistema radicular y una parte de la base del tallo, cuyo crecimiento se ve favorecido por el oxígeno que les llega a través de las raíces bombeado desde las hojas de las plantas.
21. El oxígeno es transmitido de las raíces al medio y es aprovechado por las bacterias que se encuentran en el agua para depurarla, el rendimiento conseguido es tan alto que el agua de salida puede ser reutilizada para nuevos usos.
22. Si se quiere que la macrofita depure con su máxima eficacia, hay que respetar sus hojas, sólo se podría segar al final de la primavera para extraer la biomasa vegetal y con ésta los nutrientes y metales que acumuló en ellas.
23. Este tipo de filtro es capaz de realizar un tratamiento secundario-remoción de materia orgánica- y terciario-remoción de P y N- del agua residual. Una vez estabilizado el sistema se produce una gran cantidad de biomasa.

⁵ Especies de tipo emergente.

24. Las macrofitas de interés en fitodepuración son: *Typha latifolia*, *typha angustifolia* y *typha dominguensis*. La selección de la especie a utilizar se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de las mismas, su capacidad de transportar el oxígeno desde las hojas hasta la raíz, su tolerancia a condiciones climáticas diversas, su resistencia a insectos y enfermedades, y facilidad de manejo.
25. Mediante el análisis de las diferentes *typhas* existentes, la *typha dominguensis* tiene las siguientes ventajas:
- Tiene una altura mayor que las demás, un 50% más que la siguiente en tamaño, *typha angustifolia*.
 - Por envergadura, tiene mayor capacidad de captación de oxígeno.
 - También su masa radicular es de mayor longitud, y por tanto una paralela capacidad de filtro.
 - Tiene una mayor capacidad de corte, lo que permitirá un reuso más productivo para su compostación.
 - Se encuentra perfectamente adaptada a los humedales existentes en la región.
26. Cuando las condiciones del medio natural son muy favorables, es decir, que el medio no está alterado y no hay contaminación, la *T. latifolia* compite exitosamente con las otras especies. La *T. angustifolia* y la *T. dominguensis* que suelen restringirse a medios más alterados y salinos. En condiciones de aguas de baja calidad, si hubiera la coexistencia de la *T. latifolia* con la *T. dominguensis*, esta segunda iría poco a poco desplazando a la *T. latifolia*, ya que desarrolla mayor talla y tiene menor exigencia de calidad de agua.
27. Los resultados de diferentes experiencias indican que, en comparación con otras plantas utilizadas para tratamiento de aguas (*Scirpus validus* y *Juncos effusus*, entre otras) las eneas son las plantas más eficaces para la fitodepuración. Su eficacia dependerá de los factores condicionantes del crecimiento de las plantas (básicamente temperatura y radiación).

Conclusiones del diseño y futuro proyecto

28. Con estas plantas (*typha dominguensis*) lo que se quiere realizar es: la instalación de macrofitas, en aproximadamente 40 a 60% de la laguna secundaria, desde el final hacia la interconexión con la laguna primaria, colocar las macrofitas de manera que se aproveche cada metro cuadrado de la laguna, un promedio de 13 plantas/m², para que trabaje de forma más eficiente.

Recomendaciones

De acuerdo al análisis y evaluación del tema se recomienda:

1. Implantar el sistema adaptado a las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura, que pueda ser replicado en otros sistemas de tratamiento en la región.
2. Analizar el proceso de la curva de eficiencia de las eneas, ya que a medida que las macrofitas se van volviendo adultas, el sistema toma mayor fuerza en el proceso de purificación de aguas residuales. En este proceso se deberá presentar:
 - La reducción en los costos de mantenimiento de los sistemas tradicionales, ya que permite la incorporación de las macrofitas a los sistemas existentes, en forma complementaria, repotenciándolos y asegurando su eficiencia.
 - La funcionalidad del sistema, que permite asegurar la resistencia al paso del agua por colmatación del lecho, eliminando los riesgos de contaminación en el proceso de purificación.
 - La utilidad del sistema en el tratamiento de efluentes eutrofizados o efluentes que produzcan vertidos ricos en nitrógenos y fósforo.
3. En el estudio científico de las macrofitas, se deberá establecer aspectos como:
 - El grado de tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes.
 - La capacidad de adaptabilidad al clima local.
 - La capacidad para transportar oxígeno suficiente desde las hojas hasta la raíz.
 - La resistencia a insectos, enfermedades y facilidad de manejo.
4. Desde el punto de vista tecnológico se deberá:
 - Establecer el modelo adecuado de implementación y distribución de las plantas en los sistemas de tratamiento actuales.
 - El cuidado del cultivo y su integración a la biodiversidad.

Referencias bibliográficas

- **Acevedo et al.** Filtro de macrofitas en flotación. España, 2008.
- **Chávez de Allain, A.** Curso: Tratamiento de Aguas Residuales. Piura, Septiembre 2010.
- **Dawes, A.** Desventajas del tratamiento de agua con ozono. http://www.ehowenespanol.com/desventajas-del-tratamiento-agua-ozono-lista_75517/. Estados Unidos, 2005.
- **Departamento técnico, Macrofitas S.L.** Pliego de prescripciones técnicas sobre cultivo y suministro de plantas helófitas utilizadas para tratamiento de aguas mediante la tecnología Hidrolution-FMF. Madrid, Octubre, 2012.
- **Fernández, J.** Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Madrid, 2010.
- **Fresenius et al.** Manual de disposición de aguas residuales, Tomo II. CEPIS. Lima, 1991.
- **Fundación peruana para conservación de la naturaleza.** Documento base para la elaboración de una estrategia de conservación de los humedales de la costa peruana. Lima, Setiembre 2010
- **Gallego, L.** Depuración de aguas residuales mediante el sistema hidrolution FMF y su aplicación a la agricultura y ganadería. Córdoba, Febrero 2012.
- **García, J. & Corzo, A.** Depuración con humedales construidos. Catalunya, 2008.
- **Glynn H, J. & Heinke, G.** Ingeniería Ambiental. 2ª ed. México, 1999.
- **Grupo regional de trabajo de benchmarking.** Informe Actual 2012 (datos hasta el 2011).
- **Grupo Valoralia.** Extraído de YOUTUBE 01 de Agosto de 2013, 09:58. [Archivo de video]. Video publicado en <http://www.youtube.com/watch?v=GGNUNiJkeBw>.
- **Hernández, A.** Depuración de aguas residuales. Paraninfo. Madrid, 1990.
- **Hidrolution FMF.** Sistema de macrofitas en flotación. www.hidrolution.com. Madrid, 2010.
- **Hidrolution.** Presentación técnica. Madrid, 2010.

- **Hidrosun Ingeniería S.L.** Sistema de filtros de macrofitas en flotación. España, 2010.
- **Klein, L.** Ricin Pollution 2, Causes and Effects, Butterworth, 1962.
- **Llagas, W. y Guadalupe, E.** Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Rev. Inst. investig. Fac. Minas metal cienc. geogr. ene. /junio 2006, vol.9, no.17, p.85-96. ISSN 1561-0888.
- **López, J.** Depuración de aguas residuales. Extraído 15/08/2013, a las 10:30. <http://www2.cbm.uam.es/jalopez/personal/SeminariosVarios/ERARtexto.htm>. Nd.
- **Macrofitas S.L.** Tecnología del agua española para la ecología del planeta. Madrid, 2010.
- **Méndez, J.P y Marchán, J.** “Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las EPS del Perú y propuestas de solución”. RyF Publicaciones y servicios S.A.C. Lima, 2008.
- **Metcalf & Eddy, Inc.** Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse, 2ª ed., McGraw Hill, 1972.
- **Metcalf & Eddy.** Ingeniería de Aguas Residuales. Vol. 1. Tratamiento, vertido y reutilización. 3era ed. Madrid, 1998.
- **Metcalf & Eddy.** Tratamiento y depuración de las aguas residuales. 1era ed., 1977.
- **Ministerio del Ambiente.** Manual para municipios ecoeficientes. Lima, Diciembre 2009.
- **Moreno, M^a D.** Depuración por lagunaje de aguas residuales. Manual de operadores. Marfil, S.L, 1991.
- **Rich, L.** Low Mauntenance, Mechanically Simple Wastewater Treatment Systems, Mc Graw Hill, 1980.
- **Rodríguez, J.** Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades. Tesis N° 19117. Nd.
- **Rojas, R.** “Conferencia, Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales”. Curso Internacional: Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales”. Setiembre, 2002.
- **Romero, J.** “Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño”. 3ª ed. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 3era ed. Bogotá, 2010.
- **Sáenz, R.** “Lagunas de estabilización y otros sistemas simplificados para el tratamiento de aguas residuales”. Manual DTIAPA N° C-14, CEPIS. Segunda edición. Lima, 1985.
- **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.** Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México, 2007.
- **Secretariado Alianza por el Agua.** Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Centro de las nuevas tecnologías del agua. Z-2802/08. Zaragoza España, 2008.
- **Silva, J.** Evaluación y diseño del sistema de lagunas de estabilización de la UDEP. Tesis Universidad de Piura, 1994.

- **SUNASS**. “Las EPS y su desarrollo 2012”.Lima, Diciembre, 2012.
- **SUNASS**. Determinación de la fórmula tarifaria, estructura tarifaria y metas de gestión aplicable a la entidad prestadora de servicios de saneamiento Grau S.A. Piura, Diciembre 2011.
- **SUNASS**. Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS del Perú y propuestas de solución. Lima, Agosto, 2008.
- **Torres, V.** El filtro de macrofitas en flotación para la depuración de las aguas residuales y la regeneración de ríos, lagos. Madrid, 2010.
- **United States Environmental Protection Agency**. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con luz ultravioleta. http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs-99-064.pdf
- **Universidad de Piura**. Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de las lagunas de estabilización. Piura, Noviembre del 2011.
- **Universidad Autónoma de Chihuahua**. Facultad de Ciencias Químicas. Lagunas de Estabilización. WWW Curso de Aguas Residuales (nd). Recuperado, 10 de Marzo de 2013. <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/lagunas7.pdf>
- **Universidad Politécnica de Madrid**. Grupo de Agroenergética. Departamento de Producción Vegetal. “Manual de Fitodepuración. Filtro de macrofitas en flotación”. Madrid, Diciembre 2010.
- **Usero, F.** Evaluación de emisores de riego localizado de bajo caudal en condiciones de invernadero y aguas residuales urbanas regeneradas. Almería, Setiembre 2011.
- **Valdéz E. y Vásquez A.** Fundación ICA. Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. México, Mayo 2003.
- **Vergara, A.** Las EPS y su desarrollo 2012. Gerencia de supervisión y fiscalización. Julio, 2012. (INFORME).
- **Vergès, J. F.** Servicio de agua potable y alcantarillado: lecciones de las experiencias de Alemania, Francia e Inglaterra. Santiago de Chile, 2010.