Departamento de Biología y Ciencias Ambientales
Facultad de Ciencias

EFECTIVIDAD DE UN LOMBRIFILTRO A ESCALA PILOTO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL URBANA SIMULADA

Trabajo de Titulación para Optar al Título de Ingeniero Ambiental

Por: Srta. Miryam Catalán Díaz
Sr. Manuel Pivet Reyes

Profesor Guía: Ociel Cofré Carvajal

Valparaíso Chile 2007

AGRADECIMIENTOS

La familia es necesaria, es alimento de vida, sin ella todo es sombrío, por eso hoy, quiero agradecerles la confianza y fuerza depositada para realizar uno más de mis proyectos. A mis mejores amigas, y a todas aquellas personas que estuvieron directa o indirectamente colaborando con mi tesis.

Nunca un año se presentó con tantas pruebas y obstáculos, pero con seguridad puedo decir que los aprendizajes obtenidos en este proceso marcarán mi camino de hoy en adelante. Simplemente gracias.

Miryam Catalán Díaz

El apoyo de las personas que nos rodean, es esencial para el logro de nuestras metas u objetivos, aquel apoyo que a veces viene disfrazado de una simple palmada en la espalda o un pequeño como te va, pero que siempre es significativo.

En estos momentos, me siento privilegiado por la cantidad de personas a las que debo agradecer, entre ellas esta toda mi familia, pero en especial a Olivia y a mi Tío Carlos, que sin su ayuda y apoyo simplemente no habría estudiado; a mi segunda familia los Aguayo Aguirre, por siempre preguntar como me iba y además por las incontables fotocopias, que de pagarlas habría quedado en banca rota; a mis compañeros y compañeras de universidad por la amistad, la confianza, las horas de estudio y las horas de relajo; a los dirigentes de Grupo Scout al cual pertenezco desde los 10 años, por la amistad; por último a Paula la persona más importante de mi vida, por toda la ayuda, paciencia, entrega y en especial por ese ser que en estos momentos lleva dentro, personita que me dio el ultimo aliento para terminar con esta tarea tan importante.

Gracias a todos, espero entregar lo mismo que recibo de ustedes, Buena Caza.

Manuel Pivet Reyes

RESUMEN

Existen una serie de sistemas de tratamientos biológicos para tratar aguas residuales urbanas. Estas instalaciones de tratamiento van desde los sistemas más sencillos hasta plantas complejas. Entre los más conocidos se encuentran las Lagunas Aireadas y Lodos Activados.

Se destacan, además, entre los sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas los Biofiltros. Estos sistemas presentan ventajas como estabilidad ante variaciones de carga y concentraciones de efluentes, además de bajos costos de operación y mantenimiento. Entre ellos se encuentra el Lombrifiltro que a través de un lecho estratificado, en donde una de sus capas está compuesta por lombrices (Eisenia Foetida), es capaz de reducir la carga de materia orgánica que contiene un afluente líquido.

En Chile las poblaciones pequeñas, no cuentan con recursos económicos para la instalación de sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales urbanas.

En el proyecto se pone en marcha y evalúa el funcionamiento de un Lombrifiltro de aguas residuales cuyo costo de instalación y mantenimiento es bajo, de modo que satisfaga las necesidades de la población, para generar información sobre parámetros de operación del lombrifiltro y determinar criterios de puesta en marcha de este.

Al final del periodo de experimentación, se obtuvo valores de remoción, a través del lombrifiltro, de un 85,34% de la carga orgánica (DQO), de un 80,94% de nitrógeno amoniacal y de un 85,28% de fósforo total, cumpliendo así, con los estándares de la normativa chilena aplicable: Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descarga de Residuos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (D. S. Nº 90/2000); y Requisitos para la Calidad del Agua para Distintos Usos (N.CH. Nº 1333/78 modificada 87).

CONTENIDO

RESUMEN
INTRODUCCIÓN

PAG

I PROBLEMA 1
1.1. OBJETIVOS 2
II MARCO TEÓRICO 3
2.1. GESTIÓN DEL AGUA EN CHILE 3
2.1.1. Usos del Agua 4
2.2. ORÍGENES DE LOS CAUDALES DE AGUA RESIDUAL 7
2.2.1. Orígenes y caudales de las Aguas Residuales Doméstica 7
2.3. CAUDALES DE AGUAS RESIDUALES 8
2.3.1. Composición de los caudales de agua residual 8
2.3.2. Estimación de los caudales de aguas residuales a partir de los datos de abastecimiento 9
2.3.3. Agua para Uso Público 9
2.4. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN EN LOS CURSOS DE AGUA 11
2.4.1. Parámetros de calidad del agua 12
2.4.2. Normativa y Criterios de Calidad de Agua 12
2.5. EFLUENTES Y CONTAMINACIÓN 15
2.6. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES 15
2.6.1. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual 16
2.6.2. Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua 18
2.6.3. Características físicas del agua: definición y utilidad 19
2.6.4. Características químicas: definición y aplicación 22
2.6.5. Características biológicas: definición y aplicación 25
2.7. CONSTITUYENTES DEL AGUA RESIDUAL 29
2.8. SISTEMAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS 30
2.8.1. Operaciones físicas unitarias 30
2.8.2. Procesos químicos unitarios 31
2.8.3. Procesos biológicos unitarios 32

2.9. LOMBRIFILTRO 35
2.10. SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA PEQUEÑAS COMUNIDADES 41
2.10.1. Problemas específicos asociados a las pequeñas Comunidades 42
2.10.2. Caudales de agua residual en pequeñas comunidades 43
2.10.3. Puntos a considerar en la gestión ambiental descentralizada de aguas residuales 43
2.10.4. Sistemas de tratamientos utilizados en pequeñas comunidades 44

III MATERIALES Y MÉTODOS 56
3.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL 56
3.1.1. Etapa Nº 1: Puesta en marcha 57
3.1.2. Etapa Nº 2: Operación 65

3.2. METODOLOGÍA ANALÍTICA 69
3.2.1. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno 69
3.2.2. Determinación de Fosfato y Fósforo Total 71
3.2.3. Determinación de $N\text{-}NH_3$ 73
3.2.4. Determinación del pH, Conductividad, Temperatura y Sólidos Suspendidos 75
3.2.5. Determinación de tasa de producción de vermicompost y conteo de lombrices 75

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES 76
4.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES 78
4.2. ANÁLISIS QUÍMICOS DEL AGUA 80
4.2.1. Análisis de DQO 80
4.2.2. Nitrógeno Amoniacal 82
4.2.3. Fósforo Total 84
4.3. ANÁLISIS FÍSICOS DEL AGUA 87
4.3.1. pH. 87
4.3.2. Conductividad 89

4.3.3. Sólidos Suspendidos 91
4.3.4. Temperatura 93
4.3.5. Oxígeno Disuelto 95
4.4. ANÁLISIS PRODUCCIÓN DE BIOMASA 97
4.5. TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA 98
4.6. CAUDAL 100
4.7. RESUMEN DE PARAMETROS DE OPERACIÓN 102

V CONCLUSIONES 103
BIBLIOGRAFÍA 105
ANEXOS 109

INDICE TABLAS

TABLA	PÁG
Tabla Nº1: Valores típicos de los usos públicos de agua, USA.	9
Tabla Nº2: Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias	17
Tabla Nº3: Contaminantes de importancia en el tratamiento de agua	19
Tabla Nº4: Clasificación de los microorganismos	26
Tabla Nº5: Tipos y número de microorganismos típicamente presente en el agua residual doméstica bruta	28
Tabla Nº6: Composición típica del agua residual doméstica bruta	29
Tabla N° 7: Caracterización de parámetros orgánicos correspondiente a 200 habitantes	30
Tabla Nº8: Aplicación de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de aguas residuales	31
Tabla Nº9: Aplicación de los procesos químicos unitarios en el tratamiento del agua residual	32
Tabla Nº10: Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento del agua residual	34
Tabla Nº11: Rendimiento esperado en un tanque séptico	47
Tabla Nº12: Rendimiento esperado en un tanque imhoff	49
Tabla Nº13 Rendimiento esperado en un humedal artificial	50
Tabla Nº14: Producción teórica de lombrices	59
Tabla Nº15: Concentración de Nutrientes en Efluente Urbano Simulado	60
Tabla Nº16: Aporte de DQO de los Compuesto Usados en el Efluente urbano Simulado	61
Tabla Nº17: Porcentaje de concentraciones utilizadas en el efluente urbano simulado	62
Tabla Nº18: Carga orgánica por unidad de área media teórica	63
Tabla Nº19: Análisis y Frecuencia de Medición de Parámetros	66
Tabla Nº20: Porcentaje de Reducción del Sistema Propuesto	78
Tabla Nº21: Composición del Agua Residual Urbana	79
Tabla Nº22: Resultado Análisis de DQO	80

Tabla Nº23: Resultados análisis nitrógeno amoniacal 82
Tabla Nº24: Resultados Análisis de Fósforo 84
Tabla Nº25: Análisis pH 87
Tabla Nº26: Análisis de conductividad 89
Tabla Nº27: Análisis de Sólidos Suspendidos 91
Tabla Nº28: Análisis de Temperatura 93
Tabla Nº29: Análisis de Oxígeno Disuelto 95
Tabla Nº30: Producción experimental de lombrices 97
Tabla Nº31: Tiempo de Residencia Hidráulica experimental del lombrifiltro 99
Tabla Nº32: Caudal de Entrada Lombrifiltro (l/s) 100
Tabla Nº33: Caudal de Salida Lombrifiltro (l/s) 101
Tabla Nº 34: Resumen de parámetros de operación 102

INDICE DE FIGURAS

FIGURA	PAG
Figura Nº1: Usos consuntivos del agua	5
Figura Nº2: Relación entre los usos consuntivos y no consuntivos del agua	6
Figura Nº3: Diagrama de tanque séptico convencional de concreto con dos compartimentos	46
Figura Nº4: Tanque imhoff enterrado. Vista de planta y lateral	48
Figura Nº5: Sección transversal de un humedal con flujo subsuperficial	50
Figura Nº6: Zanjas filtrantes con cámara de reparto y disposición de drenes; (b) corte longitudinal de las zanjas de infiltración	51
Figura Nº7: Esquema de pozo filtrante	52
Figura Nº8: Biodisco convencional con accionamiento mecánico y alimentación de aire opcional	53
Figura Nº9: Esquema metodología experimental	56
Figura Nº10: Esquema del Lombrifiltro	58
Figura Nº11: Distribución de los tubos de aireación en la lombrifiltro	64
Figura Nº12: Eficiencia del biofiltro: valores máximos y mínimos de los parámetros de DBO_5, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, nitrógeno total y fósforo total	77
Figura Nº13: Remoción de DQO	81
Figura Nº14: Remoción de Nitrógeno Amoniacal	83
Figura Nº15: Remoción de Fósforo total	85
Figura Nº 16: Variación de pH	88
Figura Nº 17: Variación de conductividad	90
Figura Nº 18: Variación de Sólidos Suspendidos	92
Figura Nº 19: Variación de Temperatura	94
Figura Nº 20: Variación de Oxígeno Disuelto	96

INTRODUCCIÓN

En el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales se utilizan distintos sistemas: físicos, químicos y biológicos o una combinación de ellos dependiendo del caudal a tratar y de las características fisicoquímicas del efluente. Dentro de los más utilizados se encuentran los Lodos Activos y Lagunas Aireadas, que se utilizan en efluentes con una alta concentración de materia orgánica, como los provenientes de la industria cárnica y la cervecera. Una de las desventajas que presentan este tipo de tratamiento, principalmente los biológicos, es la producción de lodos, proveniente de los tratamientos primarios y secundarios, que requieren un manejo especial que incluye estabilización, acondicionamiento, deshidratación, secado y eliminación, encareciendo finalmente proceso.

Cuando se opta por realizar un proyecto de manejo descentralizado (definiéndose como: recolección, tratamiento y vertimiento o reutilización de aguas residuales provenientes de hogares, conjuntos habitacionales, comunidades aisladas, industrias o instituciones, así como también de sectores de comunidades existentes cerca del punto de generación de residuos, (Crites y Tchobanoglous, 2000)), para tratar aguas residuales domesticas, se enfrentan múltiples desafíos en su implementación, debido a las características propias de cada población, por lo que esto generalmente requiere de una asesoría especializada para elaborar el proyecto

Una de las dificultades que presentan los sistemas tradicionales para el tratamiento de aguas servidas en pequeñas comunidades, es el costo de operación y mantención de ellas, por la tecnología a utilizar, la mano de obra requerida, la eliminación de lodos, etc., haciendo estas menos accesibles para municipios con bajo presupuesto. Por esto, se buscan tecnologías más económicas que se enfoquen en los sistemas naturales de depuración como los biofiltros, pero con la misma efectividad de las plantas de tratamientos de aguas residuales urbanas tradicionales.

El diseño y operación de plantas de tratamiento de aguas servidas en pequeños núcleos, debe resolverse con la misma eficacia que en las grandes comunidades, si bien deben emplearse otros criterios de selección:

- Prioridad de procesos que requieran un tiempo mínimo de operador,
- Equipos que requieran un mínimo de mantenimiento,
- Funcionamiento eficaz ante un amplio rango de caudal y carga,
- Gasto mínimo de energía,
- Instalaciones donde los posibles fallos de equipos y procesos causen el mínimo deterioro de calidad en el efluente,
- Máxima integración en el medio ambiente.

Una de las alternativas estudiadas para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades es el Sistema Tohá, sistema que utiliza un filtro dinámico de lecho estratificado, donde la capa principal está compuesta por las lombrices Rojas Californianas (Eisenia Foetida); y finalmente un sistema de radiación ultravioleta para la eliminación de patógenos. Este tipo de tratamiento tiene un bajo costo de instalación, de operación y de mantención, haciéndolo accesible a las pequeñas comunidades, además es ambientalmente amigable ya que, cumple con las normas chilenas aplicables y vigentes; genera un subproducto (humus) que no requiere de un manejo especial como los lodos de las plantas de tratamiento tradicionales, pudiendo ser aplicado directamente en los suelos agrícolas o vendido generando un ingreso para el municipio.

Este trabajo de titulación constó de dos etapas, la instalación y puesta en marcha de un lombrifiltro a escala piloto, para generar parámetros de operación y criterios de puesta en marcha, además de analizar la eficiencia de éste en la remoción de carga orgánica (DQO) y de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en un efluente simulado de aguas servidas. Además se realizó mediciones de parámetro físicos como: pH, conductividad, sólidos suspendidos y temperatura, para verificar si el afluente cumple con lo establecido en el D. S. Nº 90/2000 (Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales).

I

PROBLEMA

En Chile, las poblaciones menores de 5.000 habitantes, se encuentran ante el grave problema de la eliminación de sus efluentes líquidos. La instalación de sistemas tradicionales de depuración (lagunas aireadas, lodos activados, etc.) son económicamente inabordable para estas poblaciones.

Resulta evidente que los pequeños núcleos de población precisan de una tecnología de depuración de aguas residuales que, en la medida de lo posible, haga uso de la capacidad de depuración del medio natural.

La solución para este problema se encuentra en determinar un sistema de eliminación de aguas residuales urbanas que garantice una depuración suficiente y cuyo costo de instalación y mantenimiento sean viables para pequeños municipios de bajo presupuesto, ya que posiblemente el empleo en estos ambientes de tecnologías de depuración de características sofisticadas, cuya construcción exige grandes inversiones económicas, conduzca al abandono de las instalaciones en el instante en el que se producen los primeros problemas técnicos, por falta de recursos. Además, este tipo de instalaciones consumen energía y productos químicos que encarecen su mantenimiento.

El trabajo de titulación consiste en la puesta en marcha de un Lombrifiltro a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales urbanas, sistema que emplea una tecnología innovadora, que no genera residuos peligrosos y permitirá al establecimiento, en donde se realizara la investigación, reutilizar el agua tratada en riego de sus jardines y huertos.

Bajo la premisa anterior los investigadores se plantean la siguiente incógnita ¿Qué grado de efectividad tiene un lombrifiltro a escala piloto en la remoción de DQO, fósforo total y nitrógeno amoniacal en un efluente simulado?

.

1.1. OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar el grado de efectividad de un lombrifiltro a escala piloto, en la remoción DQO, fósforo total y nitrógeno amoniacal, en un efluente urbano simulado.

Objetivos Específicos

- Realizar de manera experimental la remoción de DQO, fósforo total y nitrógeno amoniacal, en un lombrifiltro a escala piloto.
- Evaluar la eficacia del lombrifiltro en el tratamiento de un efluente urbano simulado.
- Analizar parámetros de eficacia a lo menos una vez a la semana.

II
MARCO TEÓRICO

2.1.- GESTIÓN DEL AGUA EN CHILE

La promulgación de diversas normativas ambientales durante la última década ha impulsado de manera importante la construcción de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) en Chile, aumentando la cobertura de saneamiento ambiental desde prácticamente cero en 1994 a un 66 % a comienzos de 2004, cuya cobertura debería seguir aumentando en el corto plazo. (Barañao, P; Tapia, L. 2004). Desde el año 1998 a la fecha, en el sector saneamiento ambiental se ha realizado un salto cuantitativo relevante, restando aún ejecutar una serie de proyectos que al año 2010 consideran alcanzar una cobertura de tratamiento de las aguas servidas. Del total de la población urbana al año 2001 (13.576.370 habitantes), el año 1998 sólo un 9,3 % de ella trataba sus aguas servidas (Universidad de Chile. 2002). Las estimaciones de cobertura de tratamiento a nivel nacional para los próximos años de un 97,5% año 2009 y de un 99,1% para el año 2015. Considerando el indicador porcentaje de población urbana sin servicio de tratamiento de aguas servidas, en 2000 correspondía a 79,1%, el 2003 descendió a 34,3% y se espera disminuir a 0,9% en 2015. (Gobierno de Chile, 2003)

En Chile la disponibilidad y calidad del agua está comprometida, ya sea por su disponibilidad o no en las áreas necesitadas, o de su calidad adecuada para el uso y consumo humano. (Arango, J. 2003)

El problema de contaminación hídrica se atribuye a las malas prácticas agrícolas y ganaderas, a la falta de alcantarillados y mala disposición de la basura y a las actividades industriales, plantas termoeléctricas, refinerías, etc.; las cuales tienen efecto en la salud de las personas, destruyen los ecosistemas, causan pérdida del recurso, y tiene efectos indirectos en la economía del país. (Chile Sustentable. 2005)

- **Disponibilidad de agua en Chile**

Chile al igual que otros países, posee una oferta estable de agua en términos generales. La disponibilidad promedio para el año 1992 alcanzaba a los 5.475 m^3/hab/año, no obstante que desde Santiago al norte, la disponibilidad es menor a 1.000 m^3/hab/año, lo cual señala que en esas zonas la no disponibilidad del agua es un freno al proceso de desarrollo, lo cual es más evidente en las zonas áridas y semiáridas. (Universidad de Chile. 2002)

2.1.1.- Usos del Agua

Dentro de los usos del agua se puede distinguir el uso consuntivo y el no consuntivo, como se muestra en la Figura Nº 2 “Relación entre los usos consuntivos y no consuntivos del agua”. El uso consuntivo impide que el agua esté disponible para uso posterior, al menos que se devuelva en forma de lluvia, destacándose el riego, el uso doméstico y el minero e industrial, como se muestra en la Figura Nº 1 “usos Consuntivos del Agua”. El uso no consuntivo del agua la deja disponible (después de un tratamiento si es necesario), para nuevo uso sin pasar por un ciclo hidrológico, la generación de electricidad constituye el principal uso no consuntivo del agua. (Viessman, W, *et al*. 1993)

En Chile, según el último estudio realizado por la Dirección General de Aguas (DGA), la cantidad de agua utilizada alcanza aproximadamente un flujo continuo de 2.000 m^3/s, cifra que podría duplicarse en los próximos 25 años. De esta cantidad, el 67.8% corresponde a usos hidroeléctricos o no consuntivos y el 32.2% a usos consuntivos. Estos últimos representan un flujo continuo de alrededor de 650 m^3/s, desglosados de la siguiente forma:

- Riego: 84.5%, con un caudal medio continuo de 546 m^3/seg., utilizados para regar alrededor de un millón doscientas mil hectáreas.

- Minería: 5%, con un caudal continuo de 32.5 m^3/seg.

- Industria: 7%, con un caudal continuo de 45.5 m^3/seg.

- Usos domésticos: 4.4%, con un caudal continuo de unos 35 m^3/s , y es utilizado para dar abastecimiento al 98 % de la población urbana, y aproximadamente el 80% de la población rural concentrada.(Universidad de Chile. 2002)

Estas cantidades varían de una región a otra, ya que el agua se distribuye en forma desigual dependiendo de la ubicación geográfica y del clima, que en Chile va, de norte a sur, desde extremadamente seco a extremadamente lluvioso. (Lladser, M, *et al*. 2005).

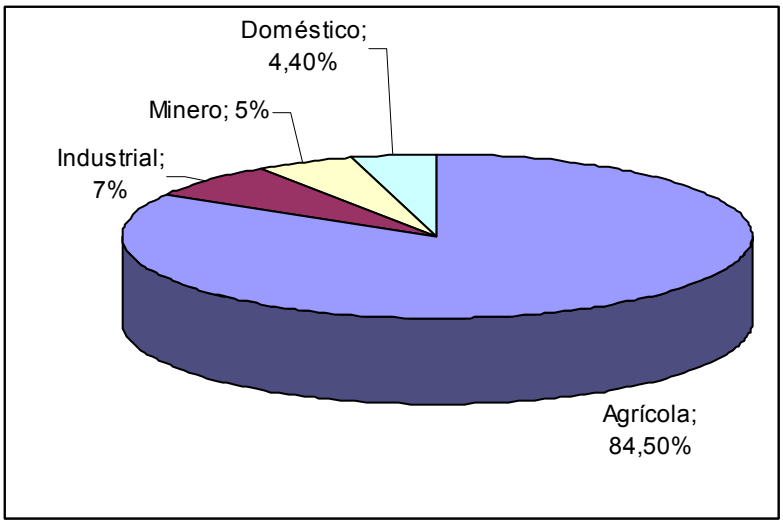


Figura N° 1: Usos consuntivos del agua

Los contaminantes de las aguas urbanas equivalen a menos del 0.5% de su masa, de modo que la purificación para nuevo uso es técnicamente factible. El 70% de toda el agua extraída del sistema hídrico se devuelve a la porción de aguas superficiales del ciclo hidrológico donde, a menos que se trastorne demasiado los sistemas naturales, rejuvenece en parte por la acción de procesos naturales. (Glynn, H. *et al.* 1999).

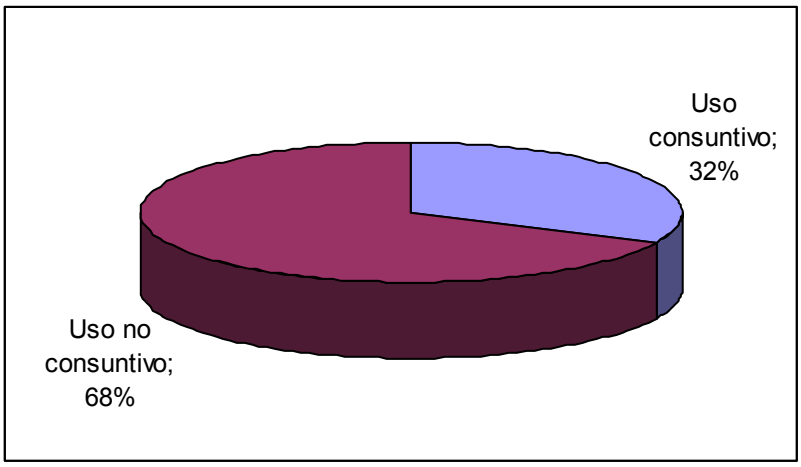


Figura N° 2: Relación entre los usos consuntivos y no consuntivos del agua

Variaciones en los usos del agua

Factores que afectan el uso publico del agua:

- Clima: Factores climáticos como la temperatura y las precipitaciones pueden afectar de manera considerable el consumo del agua.

- Tamaño de la comunidad: Afecta no solo a los valores de consumo por habitante, sino también a los consumos máximos.

- Densidad: Se refiere a las estructuras de las viviendas (unifamiliares, comunidades de vecinos y apartamentos), influye en el consumo de uso interior y exterior. Los primeros tienen relación con el uso de aparatos consumidores de agua, y los segundos a las necesidades de riego, que suelen ser menores en los bloques de departamento y comunidades de vecinos que en las viviendas unifamiliares.(Metcalf y Eddy. 1996)

- Nivel económico: El nivel económico y adquisitivo de una comunidad afecta el consumo de agua, por lo tanto también el volumen de agua residual que genera. A mayor nivel de vida mayor consumo de agua.(Metcalf y Eddy. 1996)

- Fiabilidad y calidad de servicio: Un servicio de calidad y además fiable favorece el consumo de agua. Un servicio pobre (escasez y poca presión) de mal sabor o con alto contenido de minerales, deriva en un menor consumo de agua.

- Economía del agua: La economía se puede dar de las siguientes maneras (1) la introducción de restricciones en casos de emergencias (sequías), para conseguir una reducción del consumo a corto plazo; o (2) la implementación de programas de largo alcance para conseguir la reducción permanente del consumo, mediante la instalación de dispositivos que economicen el consumo.(Metcalf y Eddy. 1996)

2.2. ORIGEN Y CAUDALES DE LAS AGUAS RESIDUALES

2.2.1. **Origen y caudales de las aguas residuales domésticas.**

Las zonas residenciales y los centros comerciales constituyen las principales fuentes de generación de aguas residuales domésticas, aunque se debe tener en cuenta, que la contribución de los edificios institucionales y los espacios recreacionales es muy importante. (Metcalf y Eddy. 1996)

Zonas residenciales. La determinación de los caudales de las aguas residuales suele hacerse en base a la densidad de la población y a la contribución por habitante.

Zonas comerciales. Los caudales de agua residual que se generan en las zonas comerciales, se basan en la comparación de datos de zonas ya existentes o de futura implementación. (Metcalf y Eddy. 1996)

Centros institucionales. Los caudales de agua residual generada en diferentes instituciones, varía según la región, el clima y el tipo de institución. Siendo la mayor fuente de información las instalaciones ya existentes. (Metcalf y Eddy. 1996)

Espacios y centros de recreo. Los caudales generados en este tipo de instalaciones varían en función de la época del año.

2.3. CAUDALES DE AGUAS RESIDUALES

La determinación de los caudales de agua residual a eliminar de una determinada población es fundamental a la hora de proyectar las instalaciones para su recogida, tratamiento y evacuación. En aquellos casos en que los datos de los caudales sean escasos o inexistentes, es preciso estimarlos partiendo de otras fuentes de información que guarden estrecha relación con los mismos, como puede ser el caso de los datos de consumo de agua. (Metcalf y Eddy. 1996)

2.3.1. Composición de los caudales de agua residual

La composición del caudal de las aguas residuales, depende del tipo de recogida que se emplee, y puede incluir los siguientes componentes:

1. Agua residual doméstica o sanitaria: Procedentes de zonas residenciales o instalaciones comerciales, públicas y similares.

2. Agua residual industrial: es el efluente residual evacuado fuera de las instalaciones de los establecimientos industriales y/o especiales, con destino directo o indirecto a colectores, cloacas máximas, conductos pluviales, cursos de agua y el suelo, ya sea mediante evacuación o depósito. (Ecoportal 2005)

3. Infiltración y aportes incontrolados: Agua que entra tanto de manera directa como indirecta en la red de alcantarillado. La infiltración hace referencia al agua que penetra al sistema a través de juntas defectuosas, fracturas y grietas, o paredes porosas. Las aportaciones incontroladas corresponden a aguas pluviales que se descargan a la red por medio de alcantarilladas pluviales, drenes de

cimentaciones, bajantes de edificios y tapas de pozo de registro. (Metcalf y Eddy. 1996)

2.3.2. Estimación de los caudales de aguas residuales a partir de los datos de abastecimiento

Para aquellos casos en que los que no se dispone de los datos de abastecimiento, se dan valores típicos de dotaciones según el tipo de usuario, aparatos domésticos e industriales, y la fracción del agua de abastecimiento que se convierte en agua residual, datos útiles para la determinación del caudal que se genera en una comunidad.(Metcalf y Eddy. 1996)

2.3.3. Agua para uso público

El agua para uso público se suele dividir en cuatro categorías: (1) uso doméstico (agua para uso general y sanitario); (2) uso industrial (no doméstico); (3) servicio público (extinción de incendios, mantención de infraestructura y riesgos de espacios verdes) y (4) perdidas en la red y fugas. La tabla N° 1 muestra valores típicos per-cápita de los diferentes usos públicos del agua. (Metcalf y Eddy. 1996)

Tabla N°1: Valores típicos de los usos públicos de agua, USA. (Metcalf y Eddy. 1996)

	Caudal (l/hab*día)		
Uso	Intervalo	Media	Porcentaje respecto al caudal medio
Doméstico	150 - 490	225	36,4
Industrial	40 - 380	265	42,4
Servicio Público	20 - 75	40	6
Pérdidas y fugas	40 - 150	95	15,2
	250 - 1.095	625	100

Uso doméstico. El agua de uso doméstico comprende el agua que abastece a zonas residenciales, comercios, instituciones y espacios recreacionales. Los usos a los que se

destina incluyen el agua que se bebe, para limpieza, higiene, fines culinarios, evacuación de residuos, y regado de jardines y zonas verdes particulares.

- zonas residenciales. El agua que su consumo se emplea tanto para uso interno (lavados, duchas), coma externos (lavado de auto, regado de jardín).

- Comercio. El agua consumida para fines higiénicos y sanitarios depende en gran medida del tipo de actividad que se desarrolle.

- Instituciones. Agua que se consume en colegios, hospitales y residencias y se mide en base a una medida de tamaño o al servicio que se espera.

- Espacios recreacionales: Agua consumida por instalaciones tales como piscina, boleras, campings, centros turísticos y clubes de deportes.

Uso industrial. La cantidad de agua que las industrias usan para sus diferentes procesos de producción es muy variable. Las grandes industrias consumidoras de agua, como las refinerías, las químicas y las conserveras, suelen abastecerse al margen de las redes públicas de abastecimiento. Por otro lado, las industrias cuyas necesidades de agua es mucho menor, si suelen abastecerse de las redes públicas.

Servicio público y mantención de infraestructura. El agua destinada para este uso representa el menor de los componentes del uso de agua, e incluye el abastecimiento de edificios públicos, las bocas de incendio, el riego de espacios verdes municipales y la mantención de infraestructura. Solo una pequeña parte del agua empleada para este uso llega a la red de alcantarillado.

Pérdidas en la red y fugas. Aquí se engloba los usos y conexiones no autorizadas, las lecturas y calibraciones incorrectas de los contadores, los contadores mal dimensionados y los sistemas de control inadecuados. Las fugas se producen por el envejecimiento de la red, mala calidad de los materiales de construcción y falta de mantenimiento. Como resultado de los factores, las pérdidas en la red alcanzan valores entre el 10 y 12%. En el caso de pequeñas redes de distribución estas pérdidas pueden llegar al 50%. (Metcalf y Eddy. 1996)

2.4. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN EN LOS CURSOS DE AGUA

Los efectos de la contaminación en las aguas se pueden resumir en:

- Degradación de los recursos hídricos ocasionando; Agotamiento del contenido en oxígeno: los organismos acuáticos precisan del oxígeno disuelto en el agua para poder vivir. Cuando se vierten en las masas de agua, residuos que se oxidan fácilmente, bien por vía química o biológica, se producirá la oxidación con el consiguiente consumo de oxígeno en el medio. Si el consumo de oxígeno es excesivo, se alcanzarán niveles por debajo del necesario para que se desarrolle la vida acuática, dándose una muerte masiva de seres vivos. Además, se desprenden malos olores como consecuencia de la aparición de procesos bioquímicos anaerobios, que dan lugar a la formación de compuestos volátiles y gases.

- Disminución de la calidad de agua para abastecimiento de la población, o para riego o para uso en la industria con limitaciones cualitativas. Afecta los procesos de auto purificación de los cauces de los ríos y a los ecosistemas produciéndose; Eutrofización: un aporte elevado de nitrógeno y fósforo en los sistemas acuáticos propicia un desarrollo masivo de los consumidores primarios de estos nutrientes; zooplancton y fitoplancton y plantas superiores. Estas poblaciones acaban superando la capacidad del ecosistema acuático, pudiendo llegar a desaparecer la masa de agua.

- Afecta la salud, la economía y las actividades de recreación: Los vertidos de efluentes residuales a cauces públicos, pueden fomentar la propagación de virus y bacterias patógenos para el hombre.

- Exige control riguroso y tratamiento de las aguas para su adecuado uso dependiendo del grado de contaminación.

- Aparición de fangos y flotantes: Existen en las aguas residuales sólidos en suspensión de gran tamaño que cuando llegan a los cauces naturales pueden dar lugar a la aparición de sedimentos de fango en el fondo de dichos cauces,

alterando seriamente la vida acuática a este nivel, ya que dificultará la transmisión de gases y nutrientes hacia los organismos que viven en el fondo. Por otra parte, ciertos sólidos, dadas sus características, pueden acumularse en las orillas formando capas de flotantes que resultan desagradables a la vista y además, pueden acumular otro tipo de contaminantes que pueden llevar a efectos más graves.

- Otros efectos: Pueden ser muy variados y van a ser consecuencia de contaminantes muy específicos, como valores de pH por encima o por debajo de los límites tolerables, presencia de tóxicos que afecta directamente a los seres vivos, etc.(Bolivar, N. 2000)

2.4.1. Parámetros de calidad del agua

Los parámetros de calidad que tienen importancia en los vertidos de aguas residuales son el oxígeno disuelto (OD), sólidos suspendidos, bacterias, nutrientes, pH, compuestos químicos tóxicos como los metales y pesticidas, DBO_5 y la materia orgánica.

La importancia del OD en la vida acuática se debe a que, en los casos en los que el nivel de OD se sitúa por debajo de 4-5 mg/l, se pueden producir efectos nocivos en determinadas especies. Los nutrientes pueden provocar eutrofización y descenso del nivel de OD. La acidez del agua, medida por su pH, afecta al equilibrio químico y ecológico de las aguas ambientales. (Metcalf y Eddy. 1996)

2.4.2. Normativa y Criterios de Calidad de Agua

La protección de la salud pública, la calidad de las aguas naturales y el control de las descargas de contaminantes al ambiente, es tema de consideración en la mayoría de los países para el desarrollo de normativa y regulaciones. Estas normativas consideran los niveles máximos comparables de diversos parámetros físicos, químicos, biológicos y radiológicos.

En Chile la autoridad encargada de la elaboración de normas es el Instituto Nacional de Normalización (INN). Las normas son preparadas por un comité de expertos, son sometidas a consulta pública y son posteriormente oficializadas por el Consejo de INN.

En el caso de la calidad microbiológica de las aguas, estas regulaciones están incluidas dentro de las normativas respectivas, según su uso. Las normas de calidad bacteriológica de las aguas en Chile son las de agua potable, uso en riego de cultivos, de recreación y para el cultivo de mariscos y peces.

Las Normas chilenas que tienen que ver con la calidad de agua son NCH 1333 de 1978, modificada en 1987, en la que se establece la normativa para el riego de cultivos y el Decreto Supremo Nº 90 sobre las descargas de aguas residuales en los cuerpos de aguas marinas y superficiales.

Norma Chilena Oficial (NCh) 1.333/78, modificada en 1987 Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos. Esta Norma es aplicable a proyectos que contemplen plantas de tratamientos de aguas servidas y viertan sus efluentes a cursos de masas de aguas superficiales o las utilicen para el riego. Fija un criterio de calidad del agua de acuerdo a requerimientos científicos referidos a aspectos físicos, químicos, y biológicos, según el determinado. Estos criterios tienen por objeto proteger y preservar la calidad de las aguas que se destinen a usos específicos, de la degradación producida por contaminación con residuos de cualquier tipo u origen. Esta norma establece los requisitos de calidad del agua de acuerdo a su uso y se debe aplicar a las aguas destinadas a los usos siguientes:

a) Agua para Consumo Humano
b) Agua para la bebida de Animales
c) Riego
d) Recreación y Estética
d.1) Estética
d.2) Recreación con Contacto Directo
d.3) Recreación sin Contacto Directo
e) Vida Acuática. (INN. 1978)

En el acápite 6 contempla los requisitos para el agua de riego, estableciendo requisitos químicos y bacteriológicos.

Entre los requisitos químicos se refiere a los siguientes aspectos específicos:

- pH, el que debe situarse entre los valores 5,5 y 9,0;

- elementos químicos, en valores máximos permisibles, pudiendo el Ministerio de Obras Públicas autorizar valores mayores o menores para los límites máximos, mediante resolución fundada para casos calificados;

- razón de adsorción de sodio, que la autoridad competente deberá establecer en cada caso;

- conductividad específica y sólidos disueltos totales, estableciéndose una tabla con una clasificación de aguas para riego según su salinidad;

- pesticidas, distinguiendo entre herbicidas, debiendo la autoridad competente pronunciarse en cada caso específico; e insecticidas, los que no son considerados perniciosos para el agua de riego.

En cuanto a los requisitos bacteriológicos, NCh N° 1333/78, establece que la concentración de los coliformes fecales en aguas de riego destinadas al cultivo de frutas y verduras que se desarrollen a ras de suelo y que habitualmente se consumen en estado crudo, debe ser menor o igual a 1.000 coliformes fecales/100 ml.

El Decreto Supremo N° 90/2000 “Norma de Emisión para la regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”. La presente norma de emisión establece la concentración máxima de contaminantes permitidas para residuos líquidos descargados de las fuentes emisoras, a los cuerpos de aguas marinos y superficiales de la República de Chile.

2.5. EFLUENTES Y CONTAMINACIÓN

Un proceso importante del proceso de deterioro de la calidad de de las aguas, está determinado por la contaminación de cuerpos continentales de agua, principalmente lagos naturales y artificiales. Según la Dirección General de Aguas (DGA), la descarga de contaminantes en los cuerpos de agua, en general, ha sido creciente. Esta tendencia debería frenarse en los cuerpos de agua más cercanos a áreas urbanas de importancia, por la construcción de las plantas de tratamiento de aguas servidas. (Universidad de Chile. 2002)

Las aguas residuales se pueden reutilizar, o bien se pueden reintroducir en el ciclo hidrológico por evacuación al medio ambiente. El impacto ambiental asociado es un elemento fundamental de la evacuación del agua residual, basado en la presencia de oxígeno disuelto. El punto clave es la capacidad de asimilación de las aguas receptoras, que representan la cantidad de DBO_5 que se puede asimilar sin poner en peligro la presencia de niveles adecuados de oxígeno disuelto. Esta atención a los niveles de oxígeno disuelto condujo a que las normativas obligarán a someter a las aguas residuales, antes del vertido a procesos de tratamiento secundario. Recientemente, se ha ampliado el número de constituyentes que hay que controlar, entre los que se ha incluido, los nutrientes, compuestos tóxicos y gran variedad de compuestos orgánicos. (Metcalf y Eddy. 1996)

2.6. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental de cara al proyecto y explotación de las infraestructuras tanto de recogida como de tratamiento y evacuación de las aguas residuales, así como para la gestión de la calidad ambiental. (Metcalf y Eddy. 1996)

2.6.1. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual

Constituyentes del agua residual

Las aguas residuales se caracterizan por sus composiciones físicas, químicas y biológicas. La Tabla N° 2 muestra las principales características físicas, químicas y biológicas del agua residual y su procedencia.

Tabla N° 2: Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias

Características	Procedencia
Propiedades físicas	
Color	Aguas residuales domésticas e industriales, degradación natural de materia orgánica
Olor	Agua residual en descomposición, residuos industriales
Sólidos	Aguas de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión de suelo, infiltración y conexiones incontroladas
Temperatura	Aguas residuales domésticas e industriales
Constituyentes químicos	
Orgánicos	
Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Grasas animales, aceites y grasas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Pesticidas	Residuos agrícolas
Fenoles	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Proteínas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Contaminantes primarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Agentes tensoactivos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Compuestos orgánicos volátiles	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
otros	Degradación natural de materia orgánica
Inorgánicos	
Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea
Cloruros	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea
Metales pesados	Vertidos industriales
Nitrógeno	Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales; aguas de escorrentía
Contaminantes primarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Azufre	Aguas de suministro; aguas residuales domésticas, comerciales e industriales
Gases	
Sulfuro de hidrógeno	Descomposición de residuos domésticos
Metano	Descomposición de residuos domésticos
Oxígeno	Aguas de suministro; infiltración de agua superficial
Constituyentes biológicos	
Animales	Cursos de agua y plantas de tratamientos
Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamientos
Protistas:	
Eubacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamientos
Arqueobacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamientos
Virus	Aguas residuales domésticas

Fuente: (Metcalf y Eddy. 1996)

2.6.2. Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua

Las normas que regulan los tratamientos secundarios están basadas en las tasas de eliminación de materia orgánica, sólidos suspendidos y patógenos presentes en el agua. Cuando se pretende reutilizar el agua residual, las exigencias normativas incluyen, además, la eliminación de metales pesados y sólidos inorgánicos disueltos. La Tabla N° 3 muestra los contaminantes de importancia en el tratamiento de agua.

Tabla N° 3: Contaminantes de importancia en el tratamiento de agua

Contaminante	Razón de imoportancia
Sólidos suspendidos	Los sólidos en suspención pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las acaciones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierte al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten en el terreno en cantidades excesiva, también pueden provocar la contaminación de las aguas subterráneas
Contaminantes primarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los metodos convencionales de tratamiento. Ejemplo típico son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual

Fuente: (Metcalf y Eddy. 1996)

2.6.3. Características físicas del agua: definición y utilidad

Las características físicas del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia

coloidal, la materia disuelta, el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad. (Metcalf y Eddy. 1996)

Sólidos totales

Se define como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación entre 103 y 105 ºC. Los sólidos sedimentables se definen como aquellos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono Imhoff) en el transcurso de un periodo de 60 minutos. Se expresa en mg/l, y constituye una medida aproximada de fango que se obtendrá en la decantación primaria. Los sólidos totales, o residuos de la evaporación, se clasifican en disuelto y en suspensión.

Olores

Los olores son debido a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El olor más característico del agua residual séptica es debido a la presencia del sulfuro de hidrógeno que se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos anaerobios.

La problemática de los olores está considerada como la principal causa de rechazo a la implementación de instalaciones de tratamiento de aguas residuales. (Metcalf y Eddy. 1996)

Temperatura

La temperatura del agua residual es por lo general mayor que la temperatura del agua para abastecimiento como consecuencia de la incorporación del agua caliente del uso doméstico e industrial. La medición de la temperatura es importante, ya que muchos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales incluyen procesos biológicos que dependen de la temperatura. (Crites y Tchobanoglous, 2000). Además, este parámetro

influye directamente sobre el desarrollo de la vida acuática, sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, y sobre la calidad del agua para ciertos usos. (Metcalf y Eddy. 1996)

Densidad

Se define como su masa por unidad de volumen, expresada en kg/m^3. De ella depende la potencial formación de corrientes de densidad en fangos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento. En ocasiones, se emplea el peso específico como alternativa a la densidad, dependiendo ambos parámetros de la temperatura y de la concentración total de sólidos en el agua residual.(Metcalf y Eddy. 1996)

Color

El color en aguas residuales es causado por sólidos suspendidos (color aparente), material coloidal y sustancias en solución (color verdadero).

En forma cualitativa, el color puede ser usado para estimar la condición general del agua residual. Si el color es café claro, el agua residual lleva aproximadamente 6 horas después de su descarga. Un color gris claro es características de aguas que han permanecido un tiempo corto en los sistemas de recolección. Si el color es de gris oscuro o negro, se trata de aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacterial bajo condiciones anaerobias. (Crites y Tchobanoglous, 2000)

Turbiedad

Medida de las propiedades de dispersión de la luz de las aguas, se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o naturales en relación con al materia coloidal y residual en suspensión. (Crites y Tchobanoglous, 2000)

2.6.4. Características químicas: definición y aplicación

Materia orgánica

Cerca de 75% de los sólidos en suspensión y del 40% de los sólidos disueltos de agua residual son de naturaleza orgánica, provenientes de los reinos animal y vegetal, y de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Los principales grupos de sustancias orgánicas son las proteínas, hidratos de carbono, grasas y aceites. Además el agua residual contiene pequeñas cantidades de un gran grupo de moléculas orgánicas sintéticas (p.e. agentes tensoactivos, contaminantes orgánicos primarios, compuestos orgánicos volátiles y pesticidas). (Metcalf y Eddy. 1996)

Proteínas. Principales componentes del organismo animal y vegetal. Su composición es muy compleja e inestable, pudiendo adoptar diferentes mecanismos de descomposición. Todas las proteínas contienen; carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. En algunos casos pueden contener azufre, fósforo y hierro. Las proteínas y la urea, son los principales responsables de la presencia de nitrógeno en el agua residual.

Hidratos de carbono. Estos incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera, contienen carbono, oxígeno e hidrógeno. Algunos de los hidratos de carbono son solubles en agua como los azúcares, en cambio los almidones son insolubles, los primeros tienden a descomponerse, gracias a las enzimas de determinadas bacterias y fermentos, produciendo alcohol y dióxido de carbono; en cambio los almidones, son más estables, pero se convierten en azúcares por la actividad bacteriana.

Grasas, grasas animales y aceites. El término grasa engloba las grasas animales, aceites, ceras y otros constituyentes presentes en el agua residual. Las grasas animales y los aceites son compuestos de alcohol (esteres) o glicerol (glicerina) y ácidos grasos. Las grasas y aceites alcanzan las aguas residuales en formas de mantequilla, manteca de cerdo, margarina, aceites y grasas vegetales. Las grasas se hallan entre los compuestos orgánicos de mayor estabilidad, no obstante sufre el ataque de ácidos minerales, lo que los transforma en glicerina y ácidos grasos.

Agentes tensoactivos. Moléculas de gran tamaño, ligeramente solubles en agua y son responsables de la aparición de espumas en las plantas de tratamiento.

Compuestos orgánicos volátiles (COV). Son aquellos compuestos que tienen su punto de ebullición por debajo de los 100 ºC, y/o una presión atmosférica mayor a 1mm Hg a 25 º C, estos son de gran importancia por:

- Una vez que dichos compuestos se hallan en estado gaseoso, su movilidad es mucho mayor, con lo que aumenta la posibilidad de su liberación al medio ambiente.

- La presencia de algunos de estos compuestos en la atmósfera puede conllevar riesgos para la salud pública.

- Contribuye al aumento de hidrocarburos reactivos en la atmósfera, lo cual puede conducir a la formación de oxidantes fotoquímicos. (Crites y Tchobanoglous, 2000)

Pesticidas y productos químicos de uso agrícola. Los pesticidas, herbicidas y otros productos químicos de uso agrícola, se hallan a nivel de traza y son tóxicos para la mayor parte de las formas de vida, por lo tanto, pueden constituir peligrosos contaminantes de aguas superficiales.

Materia inorgánica

Son varios los componentes inorgánicos de las aguas residuales y naturales, la concentración de estas sustancias aumenta tanto por el contacto del agua con las diferentes formaciones geológicas, como por las aguas residuales, tratadas o sin tratar, que en ellas se descargan, y por el proceso natural de evaporación que elimina el agua superficial dejando las sustancias orgánicas en el agua. (Metcalf y Eddy. 1996)

pH: El agua residual con concentraciones de ión hidrógeno inadecuadas presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la

concentración de ión hidrógeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de su evacuación.

Cloruros: Los cloruros que se encuentran en el agua natural proceden de la disolución de suelos y rocas que lo contengan y que están en contacto con el agua. Otra fuente de cloruros es la descarga de aguas residuales domésticas (las heces humanas suponen 6 g de cloruro por persona día), agrícolas e industriales.

Alcalinidad: Está provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de electos de calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoniaco. Los comunes son el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio. Esta ayuda a regular los cambios en el pH.

Nitrógeno: El nitrógeno y el fósforo son esenciales para el crecimiento de protistas y plantas, por eso reciben el nombre de nutrientes o bioestimuladores. El primero es esencial para la síntesis de proteínas.

Fósforo: Esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos, proviene de vertidos de aguas residuales domésticas, industriales y a través de las escorrentías naturales. Las formas más frecuentes en la que se presenta incluyen el ortofosfatos, el polifosfatos y los fosfatos orgánicos.

Azufre: El ión sulfato se encuentra en forma natural en la mayoría de agua de abastecimiento como en el agua residual, elemento necesario para la síntesis de proteínas siendo después liberado por el proceso degradación de las mismas. Los sulfatos se reducen químicamente a sulfuros y a sulfuros de hidrógeno (H_2S) por la acción microbiana en condiciones anaerobias, en los digestores de fangos.
El sulfuro de hidrógeno, que no se libera a la atmósfera, tiende a acumularse en las tuberías y a través de oxidación biológica puede pasar a ácido sulfúrico, corrosivo para las tuberías del alcantarillado.

Compuestos tóxicos inorgánicos: Muchos de estos compuestos están clasificados como metales pesados, algunos de estos cationes son de gran importancia de cara al tratamiento y evacuación de aguas residuales. El cobre (Cu), el plomo (Pb), la plata (Ag),

el cromo (Cr), el arsénico (Ar) y el boro (B) son tóxicos para los microorganismos, por lo cual deben ser considerados para proyectos de plantas de tratamientos biológicos.

Gases

El nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2), el dióxido de carbono (CO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el amoníaco (NH_3) y el metano (CH_4), son los gases que se encuentran con mayor frecuencia. Los tres últimos provienen de la descomposición de la materia orgánica de las aguas residuales. (Metcalf y Eddy. 1996)

Oxígeno disuelto: Este es necesario para la respiración de microorganismos aerobios, ligeramente soluble en agua. La cantidad real de oxígeno y la de otros gases, viene condicionada por la solubilidad del gas, presión parcial del gas en la atmósfera, temperatura y pureza del agua.

Sulfuro de hidrógeno: Se forma por la descomposición de la materia orgánica que contiene azufre, o en la reducción de sulfitos y sulfatos minerales. Cuando se combina con hierro forma el sulfuro ferroso (FeS) causante, generalmente, del ennegrecimiento de las aguas residuales y de los fangos.

Metano: Gas incoloro e inodoro de alto valor energético, producido por la descomposición anaerobia en depósitos acumulados en el fondo. En las plantas de tratamientos, el metano se genera en procesos de tratamientos anaeróbicos empleados para la estabilización de los fangos de aguas residuales.

2.6.5. Características biológicas: definición y aplicación

Los principales organismos presentes en el agua residual se clasifican en eucariotas, eubacterias y arquebacterias, perteneciendo la mayoría de ellos al grupo de las eubacterias. La Tabla N° 4 muestra la clasificación de los microorganismos. (Metcalf y Eddy. 1996)

Tabla N° 4: Clasificación de los microorganismos

Grupo	Estructura celular	Caracterización	Miembros representativos
Eucariota	Eucariota [a]	Multicelular, con gran diferenciación de las celulas y el tejido.	Plantas (plantas de semillas, musgos, helechos). Animales (vertebrados e invertebrados).
		Unicelular o coenocítica o micelial; con escasa o nula diferenciación de tejidos	Protistas (algas, hongos, protozoos).
Eubacterias	Procariota [b]	Química celular parecidas a las eucariotas	La mayoría de las bacterias.
Arquebacterias	Procariota [b]	Química celular distintiva	Metanógenos, halófilos, termacidófilos.

[a] Contiene un núcleo definido
[c] No contiene membrana celular

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1006)

Bacterias: Se clasifican como eubacterias procariotas unicelulares, además se pueden dividir en cuatro grupos dependiendo de su forma: esferoidales, bastón, bastón curvado y filamentosas, su papel es fundamental para la descomposición y estabilización de la materia orgánica.

Hongos: Protistas, eucariotas aerobios, multicelulares, no fotosintéticos y quimioheterótrofos. Juntos con las bacterias son los principales responsables de la descomposición del carbono de la biosfera. Pueden crecer y desarrollarse en zonas de baja humedad y en ámbitos de pH bajos.

Algas: El efluente de las plantas de tratamiento de aguas residuales suele ser rico en nutrientes biológicos, la descarga de éste en los lagos provoca su enriquecimiento y aumenta la tasa de eutrofización, crecimiento explosivo de algas, la presencia de estas afecta al valor de agua de abastecimiento, ya que puede provocar problemas de olor y sabor.

Protozoos: Microorganismos eucariotas, la mayoría son aerobios o facultativamente quimioheterótrofos anaerobios. Los de mayor importancia son las amebas, los flagelados y los ciliados libres y fijos. Se alimentan de bacterias y de otros microorganismos microscópicos, por lo tanto, son de gran importancia ya que mantienen el equilibrio natural entre los diferentes microorganismos.

Plantas y animales: Las plantas y animales tienen tamaños muy variados: desde gusanos y rotíferos microscópicos hasta crustáceos macroscópicos, son de gran importancia para determinar la toxicidad de las aguas residuales evacuadas al medio ambiente, y para verificar la efectividad de la vida biológica en los tratamientos secundarios empleados para destruir los residuos orgánicos.

Virus: Partículas parasitarias formadas por un solo cordón de material genético. Los virus excretados por los seres humanos representan un importante peligro para la salud pública, ya que, se sabe que estos pueden sobrevivir hasta 41 días a 20 ºC, tanto en aguas limpias como residuales.

Microorganismos en las aguas residuales

La Tabla N° 5 muestra datos del tipo y el número de microorganismos cuya presencia es habitual en las aguas residuales domésticas brutas. (Metcalf y Eddy. 1996)

Tabla N° 5: Tipos y número de microorganismos típicamente presente en el agua residual doméstica bruta

Organismos	Concentración, número/ml
Coliformes totales	10^5 - 10^6
Coliformes fecales	10^4 - 10^5
Estreptococos fecales	10^3 - 10^4
Enterococos	10^2 - 10^3
Shigella	Presentes [a]
Salmonella	10^0 - 10^2
Pseudomonas aeroginosa	10^1 - 10^2
Clostridium perfringens	10^1 - 10^3
Mycobacterium tuberculosis	Presentes [b]
Cistos de protozoos	10^1 - 10^3
Cistos de giarda	10^{-1} - 10^2
Cistos de cryptosporidium	10^{-1} - 10^1
Huevos de helminto	10^{-2} - 10^1
Virus entéricos	10^1 - 10^2

[a] los resultados de estos ensayos se suelen clasificar como positivos o negativos en lugar de ser ensayos cuantitativos

Fuente: (Metcalf y Eddy. 1996)

2.7. CONSTITUYENTES DEL AGUA RESIDUAL

En función de las concentraciones de estos constituyentes, podemos clasificar el agua residual como concentrada, media o débil. Tanto los constituyentes, como sus concentraciones presentan variaciones en función de la hora, el mes del año y otras condiciones locales. La Tabla N° 6 muestra datos típicos de los constituyentes encontrados en el agua doméstica bruta. (Metcalf y Eddy. 1996)

Tabla N° 6: Composición típica del agua residual doméstica bruta

		Concentración		
Contaminante	**Unidades**	**Débil**	**Media**	**Fuerte**
Sólidos totales	mg/l	350	720	1.200
Disueltos, totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno, mg/l: 5 días, 20 ºC (DBO_5, 20 ºC)	mg/l	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	mg/l	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1.000
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoniaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros [a]	mg/l	30	50	100
Sulfato [a]	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como $CaCO_3$)	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	n.º / 100 ml	10^6 - 10^7	10^7 - 10^8	10^7 - 10^9
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	*u* g/l	<100	100 - 400	> 400

[a] Loa valores se deben aumentar en la cantidad en que estos compuestos se hallen presentes en las de suministros

Fuente: (Metcalf y Eddy. 1996)

Tabla N° 7: Caracterización de parámetros orgánicos correspondiente a 200 habitantes(1).

Parámetros	Valor característico	Carga contaminante
DBO_5	250 (mg/L)	8000 (g/día)
Fósforo	5 (mg/L)	160 (g/día)
Nitrógeno amoniacal	50 (mg/L)	1600 (g/día)
Sólidos suspendidos totales	220 (mg/L)	7040 (g/día)

(1) se considera una dotación de agua potable de 200L/hab/día y un coeficiente de recuperación de 0,8.

Fuente: D.S. Nº 609/1998

2.8. SISTEMAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS

2.8.1. Operaciones física unitarias

Las operaciones llevadas a cabo en el tratamiento de aguas residuales, en las que los cambios en las características y propiedades del agua se realizan mediante la aplicación de las fuerzas físicas, se conocen como operaciones físicas unitarias. El origen de estas operaciones se halla en la observación directa de fenómenos que se daban en la naturaleza.

La Tabla N° 8 muestra las operaciones físicas unitarias más comunes empleadas en el tratamiento de aguas residuales. (Metcalf y Eddy. 1996)

Tabla N° 8: Aplicación de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de aguas residuales.

Operación	Aplicación
Medición del caudal	Control y seguimiento de procesos, informes de descargas
Desbaste	Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción (retención en superficie)
Dilaceración	Trituración de sólidos gruesos hasta conseguir un tamaño mas o menos uniforme
Homogeneización del caudal	Homogeneización del caudal y de las descargas de DBO y sólidos en suspensión
Mezclado	Mezclado de productos químicos y gases con el agua residual, mantenimiento de los sólidos en suspensión
Floculación	Provoca la agregación de pequeñas particulas aumentando el tamaño de las mismas, para mejorar la eliminación por sedimentación por gravedad
Sedimentación	Eliminación de sólidos sedimentables y espesado de fangos
Flotación	Eliminación de sólidos en suspensión finamente divididos y de partículas con densidades cercana a la del agua. También espesa los fangos biológicos
Filtración	Eliminación de los sólidos en suspensión residuales presentes después del tratamiento químico o biológico
Microtamizado	Mismas funciones que la filtración. También la eliminación de las algas de los efluentes de las lagunas de estabilización
Transferencia de gases	Adición y eliminación de gases
Volatilización y arrastre de gases	Emisión de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles del agua residual

Fuente: (Metcalf y Eddy. 1996)

2.8.2. Procesos químicos unitarios

Son procesos empleados en el tratamiento de aguas residuales en donde la transformación se produce mediante reacciones químicas. Una de las ventajas inherentes asociada a este tipo proceso, es que se trata de procesos aditivos, en donde la eliminación de un constituyente se consigue mediante la adición de otra sustancia. La Tabla N° 9 resume los procesos químicos unitarios en el tratamiento de agua residual. (Metcalf y Eddy. 1996)

Tabla N° 9: Aplicación de los procesos químicos unitarios en el tratamiento del agua residual.

Proceso	Aplicación
Precipitación química	Eliminación de fósforo y mejora de la eliminación de sólidos en suspensión en las instalaciones de sedimentación primaria empleadas en tratamientos fisicoquímicos
Adsorción	Eliminación de materia orgánica no eliminada con métodos convencionales de tratamiento químicos y biológicos. También se emplea para declorar el agua residual antes de su vertido final
Desinfección	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades (puede realizarse de diversas maneras)
Desinfección con cloro	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades. El cloro es el producto químico más utilizado
Decloración	Eliminación del cloro combinado residual total remanente después de la cloración (puede realizarse de diversas maneras)
Desinfección con dióxido de cloro	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades
Desinfección con cloruro de bromo	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades
Desinfección con ozono	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades
Desinfección con luz ultravioleta	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades
Otros	Para alcanzar objetivos específicos en el tratamiento de las aguas residuales, se pueden emplear otros compuestos químicos

Fuente: (Metcalf y Eddy. 1996)

2.8.3. Procesos biológicos unitarios

Panorámica general del tratamiento biológico del agua residual

El proceso de tratamiento biológico del agua residual consiste en el control del medio ambiente de los microorganismos, de modo que se consigan condiciones óptimas de crecimiento. Los principales grupos de procesos de tratamiento biológico son los:

- Aerobios: procesos que se dan en presencia de oxígeno.
- Anaerobios: procesos que se dan en ausencia de oxígeno.

Estos además se dividen en:

- Sistema de biomasa en suspensión: son los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en gases y tejido celular, se mantienen en suspensión dentro del líquido.

- Sistema de biomasa fija: son los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en gases y tejido celular están fijados a un medio inerte, tal como piedras, escorias, o materiales cerámicos y plásticos especialmente diseñados para cumplir con esta función. Los procesos de cultivo fijo también se conocen con en el nombre de procesos de película fija.

Los objetivos del tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. En el caso del agua residual doméstica, el principal objetivo es la reducción de materia orgánica presente y, en muchos casos, la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. En el caso de las aguas de retorno de usos agrícolas, el principal objetivo es la eliminación de los nutrientes que puedan favorecer el crecimiento de plantas acuáticas, como el nitrógeno y el fósforo. En el caso de las aguas residuales industriales, el principal objetivo es la reducción de la concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos. (Metcalf y Eddy. 1996)

La eliminación de al DBO carbonosa, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables, y la estabilización de la materia orgánica se consiguen biológicamente, gracias a la acción de una variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Los microorganismos se utilizan para convertir la materia orgánica carbonosa coloidal y disuelta en diferentes gases y tejido celular. Dado que el tejido celular tiene un peso específico ligeramente superior al del agua, se puede eliminar por decantación. La Tabla N° 10 muestra los principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento del agua residual.

Tabla N° 10: Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento del agua residual.

Tipo	Nombre común	Aplicación [a]
Procesos aerobios		
Cultivo en suspensión	Procesos de fangos activados Convencional (flujo pistón) Mezcla completa Aireación graduada Oxígeno puro Reactor intermitente secuencial Contacto y estabilización Aireación prolongada Canales de oxidación Tanques profundos (30,0) Deep shaft	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	Nitrificación de cultivos en suspensión	Nitrificación
	Lagunas aireadas	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	Digestión aerobia Aire convencional Oxígeno puro	Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa
Cultivo fijo	Filtros percoladores Baja carga Alta carga	Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación
	Filtros de desbastes	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	Sistemas biológicos rotativos de contacto (RBC)	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	Reactores de lecho compacto	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
Procesos combinados	Biofiltros aactivados Filtros percoladores con contacto de sólidos, procesos de fangos activados con biofiltros, proceso de filtros percoladores y fangos activados en serie	
Procesos anóxicos		
Cultivo en suspensión	Desnitrificación con cultivo en suspensión	Desnitrificación
Cultivo fijo	Desnitrificación de pelicula fija	Desnitrificación
Procesos anaerobios		
Cultivo en suspensión	Digestión anaerobia Baja carga, una etapa Alta carga, una etapa Doble etapa	 Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa
	Procesos anaerobios de contacto	Eliminación de la DBO carbonosa
	Manto de fango anaerobio de flujo ascendente	Eliminación de la DBO carbonosa
Cultivo fijo	Filtro anaerobio	Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de residuos (desnitrificación)
	Lecho expandido	Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de residuos
Procesos anaerobios, anóxicos o aerobios combinados		
Cultivo en suspensión	Proceso de una o varias etapas, múltiples procesos patentados	Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación y eliminación de fósforo
Procesos combinados: cultivo fijo y en suspensión	Proceso de una o varias etapas	Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación, eliminación de fósforo
Procesos en estanques	Lagunas aerobias Estanques de maduración (terciarios) Estanques facultativos Estanques anaerobios	Eliminación de la DBO carbonosa Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación) Eliminación de la DBO carbonosa Eliminación de la DBO carbonosa (estabilización de residuos)

[a] La principal aplicación se presenta en primer lugar, entre paréntesis se exponen otros usos

Fuente: (Metcalf y Eddy. 1996)

2.9. LOMBRIFILTRO

El Biofiltro Dinámico Aeróbico o Lombrifiltro, es un filtro percolador, el que está compuesto por una piscina o estanque relleno con diferentes capas filtrantes, teniendo en la parte superior lombrices. Posee una profundidad mínima de un metro, el ancho y el largo dependen del volumen y características de los desechos a reciclar. (Ministerio de Agricultura. 2002)

Este sistema de tratamiento de aguas residuales consiste básicamente en repartir homogéneamente el efluente, a través de un sistema de aspersión, para que el agua percole, quedando retenida la materia orgánica en los lechos filtrantes para luego ser digeridos por las lombrices y por microorganismos adheridos al medio filtrante, este proceso demora entre 7 a 12 minutos. (Ilustre Municipalidad de Los Andes. 1999)

En la composición del relleno se distinguen tres estratos diferentes: una base de doble fondo, destinada al drenaje del sistema y a formar una capa de aire para permitir la existencia de la generación de una flora bacteriana aeróbica; una capa de bolones con gravilla, una capa de aserrín más viruta, de aproximadamente 30 centímetros y en la parte superior una capa de lombrices (Eisenia foetida), con excelente capacidad degradadora de residuos de origen orgánico, lo que permite un tratamiento completo de la parte sólida y líquida de la cual el 60% se transformará en humus.(Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile. 2005)

La capa filtrante inferior de este estanque funciona como un filtro percolador de baja tasa y los microorganismos adheridos a este medio son aeróbicos, ya que el biofiltro posee en su parte inferior un doble fondo, que permita una rápida evacuación del agua tratada y también una oxigenación por la parte inferior del sistema.(Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile. 2005)

Características del lombrifiltro

- No usa reactivos químicos ni sustancias tóxicas que afecten el medio ambiente.
- El sistema no se impermeabiliza, debido a que las lombrices están en constante movimiento, creando túneles y canales en el filtro, permitiendo el paso del agua sin problemas.

- El sistema funciona por unidad de superficie, por lo que se puede ir ampliando de acuerdo a las necesidades requeridas.

- No genera lodos inestables, toda la materia orgánica se transforma en masa corporal de las lombrices y en humus, por lo que no necesita sistemas adicionales para controlarlos.

- Las lombrices se reproducen constantemente, por lo tanto no se requiere reponerlas.

- La mantención y limpieza es mínima, manual y sencilla, se deberá realizar con la periodicidad que sea necesaria, para mantener la permeabilidad del sistema e impedir la aparición de vegetación en la superficie.

- No ocupa grandes extensiones de terreno, tampoco genera olores ya que el sistema trata el agua en forma dinámica.

- Es ecológico porque permite reutilizar el agua tratada para regadío lo cual, en un escenario donde el agua sea escasa, puede ser un importante ahorro.(Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile. 2005)

- Los costos de inversión son más bajos que los sistemas tradicionales, por tratarse de una tecnología basada en un proceso natural.(Ilustre Municipalidad de Los Andes. 1999)

- Cumple con las normas vigentes de calidad de agua apta para riego (Norma Chilena Nº 1.333 y Decreto Supremo N° 90/2000) y puede descargarse sin problemas a los cauces superficiales por tratarse de un agua inodora e incolora.(INN. 1978)

- El lombrifiltro puede pasar hasta 30 días sin agua, por la capacidad del medio filtrante para retener la humedad, manteniéndose la flora microbiana y lombrices. (Contreras, S. *et al.* 2001)

Microbiología del proceso

La comunidad biológica presente en el Lombrifiltro se compone principalmente de protistas, incluyendo bacterias facultativas, aeróbicas y anaeróbicas, hongos, y protozoos. Las bacterias facultativas son microorganismos predominantes en el Lombrifiltro y junto con las bacterias aeróbicas y anaeróbicas, descomponen la materia orgánica del agua a tratar. Entre las especies bacterianas normalmente asociadas con el Lombrifiltro están: *Acrhromobacter, Flavobacterium, Pseudomonas y Alcaligenes*. Dentro de la capa de aserrín, donde prevalecen condiciones adversas al crecimiento, existen las formas filamentosas *Sphaerotilus Natans y Beggiatao*. En las zonas más bajas del Lombrifiltro, se encuentran los distintos tipos de bacterias dependiendo la cantidad de oxígeno que exista, si no existe buena aireación se encontrarán bacterias nitrificantes *Nitrosomas y Nitrobacter.* (Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile. 2005)

Las poblaciones individuales de la comunidad biológica nombradas anteriormente son variables en toda la profundidad del filtro en función de los cambios que se produzcan en la carga orgánica, carga hidráulica, composición del agua residual afluente, pH, temperatura, disponibilidad de aire y otros factores.(Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile. 2005)

Las lombrices presentes en las capas superiores del Lombrifiltro consumen la materia orgánica (de mayor tamaño) y la degradan transformándola en humus, además permiten que se generen los microorganismos antes descritos y asociados a estos, las

lombrices están en constante movimiento lo que permite mantener la permeabilidad y aireación del filtro. (Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile. 2005)

La lombriz Roja Californiana (Eisena foetida) está clasificada en el reino animal como Anélido terrestre de la clase Oligoquetos, vive en ambientes húmedos, es fotofóbica predominantemente de color rojo y mide de 6 a 8 centímetros de largo y de 3 a 5 milímetros de diámetro, el peso de la lombriz es de 1 gramo y consume diariamente una cantidad de residuos orgánicos, (de la industria, la ciudad, mataderos, aguas servidas y lodos cloacales) equivalente a su peso corporal o a la mitad según las condiciones de vida. También consume todo tipo de desechos agropecuarios (estiércol, rastrojos de cultivos, residuos de hortalizas y frutas, malezas, etc.), siendo un excelente recuperador. Carece de dientes, por lo que succiona el alimento húmedo por la boca. El 60% de que lo ingiere lo transforma en abono y el resto lo utiliza para su metabolismo y generar tejidos corporales. Se puede criar en gran cantidad, y en pequeños espacios podría alcanzar densidades de hasta 50.000 unidades por metro cuadrado, es dócil y se adapta rápidamente a las actividades del criadero, no cava galerías verticales, sino que circulares y deja el humus dentro de las galerías sin alterar su ritmo de reproducción y hábitos alimenticios. Es un animal que desarrolla todo su ciclo biológico en un ambiente de no más de 30 centímetros de sustrato. Esto es importante ya que las labores de ventilación, alimentación o riego del lombrifiltro alteran su hábitat habitual. Vive en promedio 4 años y puede llegar a los 15 años de vida; y no contrae ni transmite enfermedades, es extraordinariamente prolífera; madura sexualmente entre el segundo y tercer mes de vida. Deposita cada 7 a 10 días una cápsula o huevo de color blanco amarillento y va a variar en la medida que madure, hasta llegar a un color café oscuro, este huevo contiene 2 a 20 embriones que a su vez después de 14 a 21 días de incubación eclosionan, naciendo lombrices en condiciones de moverse y nutrirse de inmediato, presentando una tasa de reproducción de 1500 (lombrices/año). (Ministerio de Agricultura. 2002). Una cápsula podrá permanecer en estado de letargo sin avanzar en su proceso de maduración, si las condiciones ambientales cambian drásticamente. (Ilustre Municipalidad de Rinconada de Los Andes, 2001)

Estas lombrices se mantienen dentro de los siguientes parámetros; la temperatura adecuada es entre 15 a 24 º C y su nivel óptimo es de 20 º C, cuando la temperatura es

menor a 7 º C, las lombrices no se reproducen pero siguen produciendo humus, aunque en menor cantidad ;la humedad óptima es de 75 % y un nivel adecuado fluctúa entre 70 y 80 % alcanzando su máxima capacidad de reproducción; el pH tiene su nivel óptimo de 6,5 a 7,5 y en un rango entre 6,0 y 8,0 alcanza su nivel adecuado. (Bollo, T. 1999).

El humus de la lombriz además de ser un excelente fertilizante, es un mejorador de las características físico-químicas del suelo, de su estructura (haciéndola más permeable al agua y al aire), aumentando la retención hídrica, regulando el incremento y la actividad de los nitritos del suelo, y la capacidad de almacenar y liberar los nutrientes requeridos por las plantas de forma equilibrada (nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y boro). (Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile. 2005). Su pH es neutro y se puede aplicar en cualquier dosis sin ningún riesgo de quemar las plantas. (Bollo, T. 1999). El exceso de lombrices puede ser usado como alimento para aves y peces por su alto valor en proteínas. (Ministerio de Agricultura. 2002)

El humus es un producto con altas posibilidades de comercialización en el sector agropecuario, su calidad es un factor importante para obtener los mejores precios del mercado. Estos pueden fluctuar desde 70 a 180 dólares la tonelada (aproximadamente dos metros cúbicos), dependiendo del mercado y de la relación oferta-demanda del mismo (Bollo, T. 1999).

La lombriz común no es recomendable para la explotación racional de los residuos orgánicos ya que la misma cava galerías verticales, viven a más de 100 centímetros de profundidad, deposita sus deyecciones sobre la superficie terrestre, es menos prolífica, se reproduce únicamente en verano, y de cada huevo nace solamente una lombriz (Bollo, T. 1999).

Sistema Tohá

Debido a las excelentes características y función degradadora que tienen las lombrices en el tratamiento de residuos sólidos, se investigó la utilidad de estos organismos en tratar las aguas servidas como un todo; vale decir, el tratamiento de la parte líquida junto con la parte sólida.

Esta experiencia fue realizada en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, obteniéndose resultados bastantes prometedores, los que han sido corroborados en la planta experimental de aguas servidas CEXAS, Melipilla, en convenio entre la Universidad de Chile y EMOS. Algunas características de funcionamiento de esta tecnología son las siguientes:

i.- El agua servida es regada sobre un lecho compuesto por distintos estratos, conteniendo en los superiores un alto número de lombrices.

ii.- El agua servida escurre por el medio filtrante quedando retenida la materia orgánica.

iii.- La materia orgánica del agua servida es consumida por las lombrices, oxidándola a anhídrido carbónico y agua, pasando una parte menor de ella a constituir masa corporal de las lombrices y otra mayor deyecciones de las mismas; estas últimas constituyen el llamado humus de la lombriz.

iv.- Los microorganismos presentes en el agua servida son reducidos en dos órdenes de magnitud, debido a sustancias que son generadas por las lombrices y los demás microorganismos consumidores de materia orgánica que vive junto con las lombrices.

Como tratamiento posterior, se ha implementado la desinfección por radiación ultravioleta (UVc)para reducir la cantidad de microorganismos del agua tratada por el Lombrifiltro, el tiempo se exposición medio debe ser de 10 (s) con una dosis letal de energía ultravioleta de 30.000 ($uW*s/cm^2$); esto es posible por las condiciones fisicoquímicas que presenta el agua al salir del filtro y permite evitar la aplicación de sustancias químicas (p.e. cloro,) que tienen en general efectos colaterales y mayores costos de inversión y operación. (Ilustre Municipalidad de Rinconada de Los Andes, 2001)

La aplicación de los Lombrifiltro, debido a la facilidad de ser dimensionado a cualquier escala mediante módulos. Se puede aplicar en el tratamiento de aguas servidas de (Arango, J. 2003):

- Residencias privadas.

- Escuelas.
- Comunidades rurales.
- Balnearios, condominios, campamentos.
- Municipalidades, poblaciones, aeropuertos.
- Industrias agroalimentarias (mataderos, empresas vinícolas y frutícolas, etc.).

2.10. SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA PEQUEÑAS COMUNIDADES

Se define como pequeñas comunidades aquellas con poblaciones iguales o inferiores a 1000 habitantes. Estas comunidades representan el 32% de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS), pero solo un 0.7% del total de la capacidad de tratamiento, mientras que el 77% de las PTAS existentes dan servicio a poblaciones de 10.000 habitantes o menos, representando el 8 % de la capacidad de tratamiento. Por su ubicación geográfica y desarrollo, las pequeñas comunidades presentan una serie de problemas específicos que hacen difícil la provisión de sistemas tanto de abastecimiento de agua potable como de tratamiento de aguas residuales. (Metcalf y Eddy. 1996)

Las pequeñas comunidades se pueden agrupar de la siguiente manera:

- *Residencias individuales:* las aguas residuales provenientes de residencias individuales y otras instalaciones comunitarias en localidades sin alcantarillados. (Castro, F. ; Olivares, G., 2003)

- *Conjunto residenciales:* grupos o Conjuntos de residencias individuales, pueden combinar sus aguas residuales y tener sistemas descentralizados para su tratamiento y su reutilización. (Castro, F. ; Olivares, G., 2003)

- *Instalaciones públicas:* las instalaciones públicas como las escuelas, zonas de descanso en autopistas, prisiones, restaurantes, campamentos y zonas recreacionales, que con frecuencia están aislados de la red pública de alcantarillado. (Castro, F. ; Olivares, G., 2003)

- *Sistemas comunitarios:* se puede hacer una integración entre distritos locales, para el manejo de aguas residuales provenientes de baja densidad residencial, y áreas de mayor densidad residencial con alcantarillados ya desarrollados. Se varía según el tamaño del sistema y las oportunidades locales para la reutilización. (Castro, F. ; Olivares, G., 2003)

- *Parques industriales:* edificios de oficina e instalaciones industriales aisladas, puedes ser servidas por sistemas descentralizados. La reutilización de aguas puede lograrse en estos casos al usar tecnologías que van desde los filtros de lecho empacado con recirculación, hasta la combinación de lodos activados y tecnologías de membranas. (Crites; Tchobanoglous, 2000)

2.10.1. Problemas específicos asociados a las pequeñas comunidades

Los principales problemas que se presentan están relacionados con: (1) normativas de vertido; (2) costos por habitante elevados; (3) limitaciones de financiación, y (4) presupuestos limitados para la explotación y mantenimiento de las instalaciones.
Normativas de vertidos: Para la preservación del medio ambiente, las normativas de vertido de aguas residuales tratadas son las mismas para comunidades grandes que para pequeñas, y son mencionadas en el Decreto Supremo Nº 90/2000 “Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las descargas de Residuos líquidos a aguas Marinas y Continentales Superficiales.”

Elevado costo por habitante: El hecho de que la población esté más dispersa, contribuye a elevar el costo por habitante entre 2 y 4 veces superior en una comunidad de 1000 habitantes que en una de 100.000.

Factibilidad económica: En general lo problemas de las poblaciones pequeñas obedecen a uno o más de los siguientes motivos; menores ingresos por vivienda, recaudación de impuestos entre otros.

Posibilidades de explotación y mantenimiento limitadas: Las pequeñas comunidades disponen de recursos económicos limitados y escasa experiencia en la gestión de

instalaciones de tratamiento de aguas residuales. Con frecuencia los problemas están relacionados con el diseño, contratación, deficiente control de ejecución de las obras, gestión del proyecto, facturación, contabilidad, presupuestos, explotación y mantenimiento. La superación de estos problemas hace que la implementación de instalaciones de tratamiento constituya una empresa de gran envergadura. (Metcalf y Eddy. 1996)

2.10.2. Caudales de agua residual en pequeñas comunidades

El caudal medio típico por habitante varía entre 300 y 450 L/ hab* d. Estos valores típicos son superiores a los de los caudales previsibles en una residencia aislada, hecho que se debe a las contribuciones de establecimientos comerciales e industriales. A pesar de que en esta se indica un intervalo de valores, partiendo de una ocupación media entre 2,4 y 2,8 residentes por vivienda se puede considerar 210 L/ hab * d como valor típico. (Metcalf y Eddy. 1996)

En Chile, según la DGA el consumo anual de agua llega a 37,5 m^3/s, lo que significa 288 L/ hab*día. (Crisis y Sustentabilidad en la Gestión de las Aguas en Chile, 1998)

2.10.3. Puntos a considerar en la gestión ambiental descentralizada de aguas residuales

Puntos a considerar en la gestión ambiental descentralizada (pequeñas comunidades) de aguas residuales. (Crites y Tchobanoglous, 2000)

1. Cuando la gestión y la operación de los sistemas locales existentes deben ser mejoradas.

2. Cuando los sistemas individuales locales han fracasado y la comunidad no puede afrontar el costo e un sistema convencional de manejo de aguas residuales.

3. Cuando las instalaciones están distantes de otros alcantarillados existentes.

4. Cuando la oportunidad de reutilización de agua es posible.

5. Cuando el agua fresca para abastecimiento es escasa.

6. Cuando la capacidad de la planta de tratamiento es limitada y no se dispone de financiamiento para una ampliación.

7. Cuando por razones del tipo ambiental, la cantidad de efluente vertido debe ser restringida.

8. Cuando la ampliación de las instalaciones de recolección y tratamiento implica una interrupción innecesaria de las actividades de la comunidad.

9. Cuando las condiciones locales o ambientales que exigen un tratamiento adicional de las aguas residuales o el transporte de las mismas están aisladas de ciertas zonas.

10. Cuando la densidad residencial es baja.

11. Cuando la regionalización requiere de una anexión política, que no sería aceptada por la comunidad.

12. Cuando los constituyentes específicos de las aguas residuales son tratados o alterados en forma más apropiada en el punto de generación.

2.10.4. Sistemas de tratamientos utilizados en pequeñas comunidades

Los sistemas de tratamiento para aguas residuales domésticas que se están utilizando en Chile se pueden agrupar en forma general como biodisco, fosa séptica, lagunas, lodos activados modalidad aireación extendida y lombrifiltros.

Dentro de las alternativas de tratamientos de aguas residuales domesticas en pequeñas comunidades, los más utilizados en todo el mundo por tratarse de tecnologías probadas y eficaces, se encuentran los tanques sépticos, tanque Imhoff, humedales, zanjas de infiltración, pozos de infiltración, biodiscos y lagunaje.

Tanques Sépticos

El sistema de tratamiento de efluentes a pequeña escala, tanto para residencias particulares como colectivas, más usual dentro como fuera de Chile, ha sido durante años el tanque séptico.

Actualmente su uso en poblaciones equivalentes a 500 habitantes ha sido satisfactorio, debido al desarrollo de nuevas técnicas para su fabricación.

La Figura N° 3,muestra un esquema de la fosa séptica, donde el tanque prefabricado consta de dos compartimentos que permiten la sedimentación y la iluminación de flotante actuando también como digestor anaerobio sin mezclado ni calentamiento, demás de almacenamiento de lodos y espumas. Hay construcciones de uno y tres compartimentos, pero siendo este último el más completo y por lo tanto el más recomendable, sin embargo prácticamente nadie usa este diseño en Chile. Esta configuración presenta una indiscutible ventaja por sobre el sistema de un solo compartimiento, en el cual suele existir una resuspensión de material por las burbujas de biogás (generado a partir del metabolismo de microorganismos anaerobios), lo que dificulta una eficiente sedimentación de sólidos.

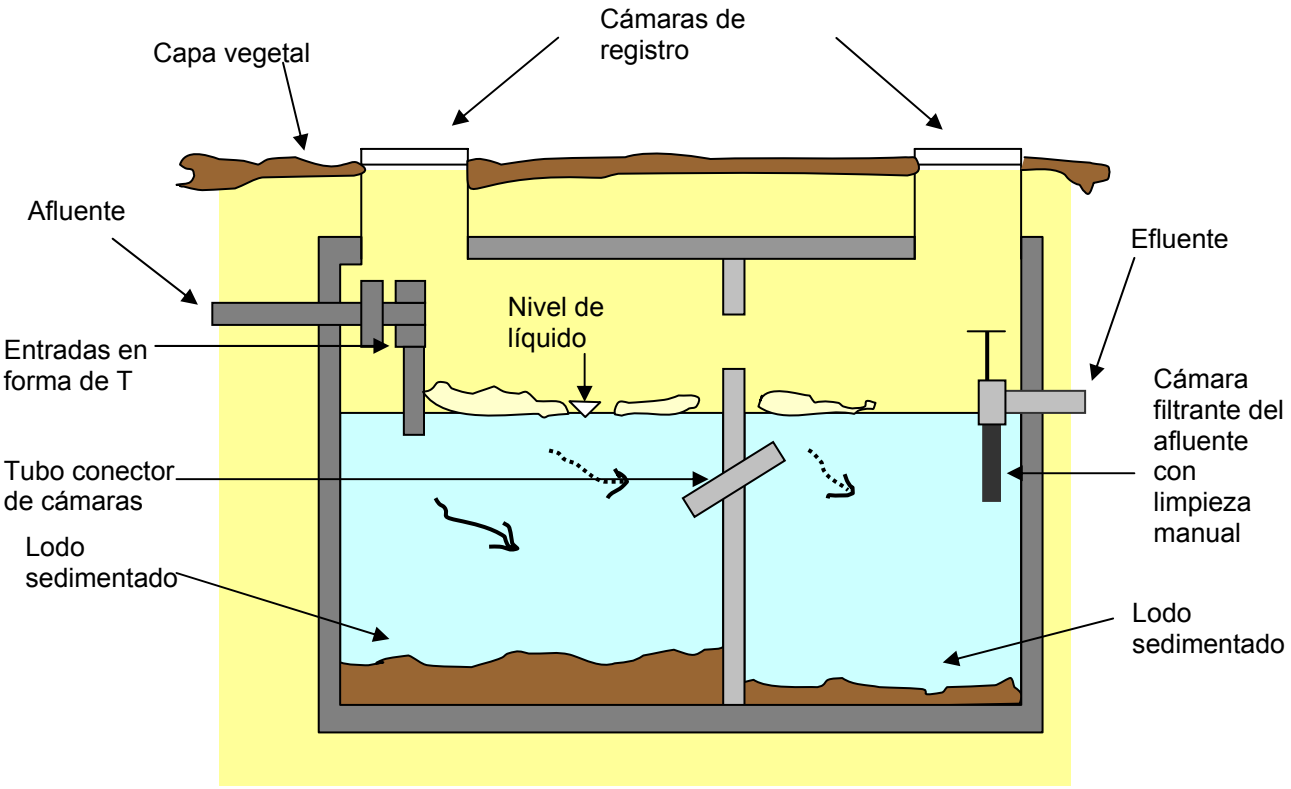


Figura N° 3: Diagrama de tanque séptico convencional de concreto con dos compartimentos.

: Flujo de los sólidos; .....> :Flujo del líquido

La operación comienza cuando los sólidos sedimentables, que están en el agua residual afluente, forman una capa de lodo en el fondo del tanque séptico y las grasas, aceites y otros materiales ligeros migran a la superficie, los que al acumularse forman una capa de espuma. Entonces, el agua está dispuesta para seguir a otro tratamiento o ser infiltrada a terreno. En el fondo del tanque ocurre la descomposición anaerobia de la materia orgánica que es transformada a compuesto y gases más estables como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). Generalmente, la composición de los lodos corresponde a hilachas de tela que han sido lavadas y lignina, procedente del papel higiénico. Estos componentes son los que se acumulan durante largo tiempo en el tanque, esperando ser degradado biológicamente, esto debido a su lenta velocidad de descomposición. Una fracción del lodo alimentado se adhiere a las burbujas de gas generadas en el proceso de descomposición de material sólido del fondo del tanque, y asciende junto con ellas aumentando el espesor de la capa de espuma

formada en la superficie del tanque y disminuyendo así la capacidad de decantar los sólidos suspendidos.

La producción de lodos del sistema es baja comparada con sistemas aeróbicos, lo cual constituye una ventaja para las comunidades pequeñas, ya que el manejo de lodos, su tratamiento y disposición final, no es fácil, al menos que sea factible implementar una cancha de sacado, lo que actualmente no siempre se cumple. (Crites; Tchobanoglous, 2000)

Tabla N° 11: Rendimiento esperado en un tanque séptico

Parámetro	DBO_5	SST	NTK	P total	Coliformes	TRH
Remoción	20 – 40%	40 – 85%	0 – 10%	0 – 10%	1 – 2 (elim.. log)	24 horas

Fuente: (Castro, F. ; Olivares, G., 2003)

Tanque imhoff

La conformación del tanque imhoff está orientada, al igual tanque séptico, a la sedimentación y digestión anaerobia de sólidos sedimentables, pero se separan los fenómenos de decantación y digestión los cuales son incompatibles. Con este propósito el tanque imhoff consta de dos pisos, en el superior ocurre la sedimentación y en el inferior la digestión. El decantador imhoff es ampliamente usado en Estados Unidos para pequeños poblados, cuyo afluente dado supera los 38 (m^3).

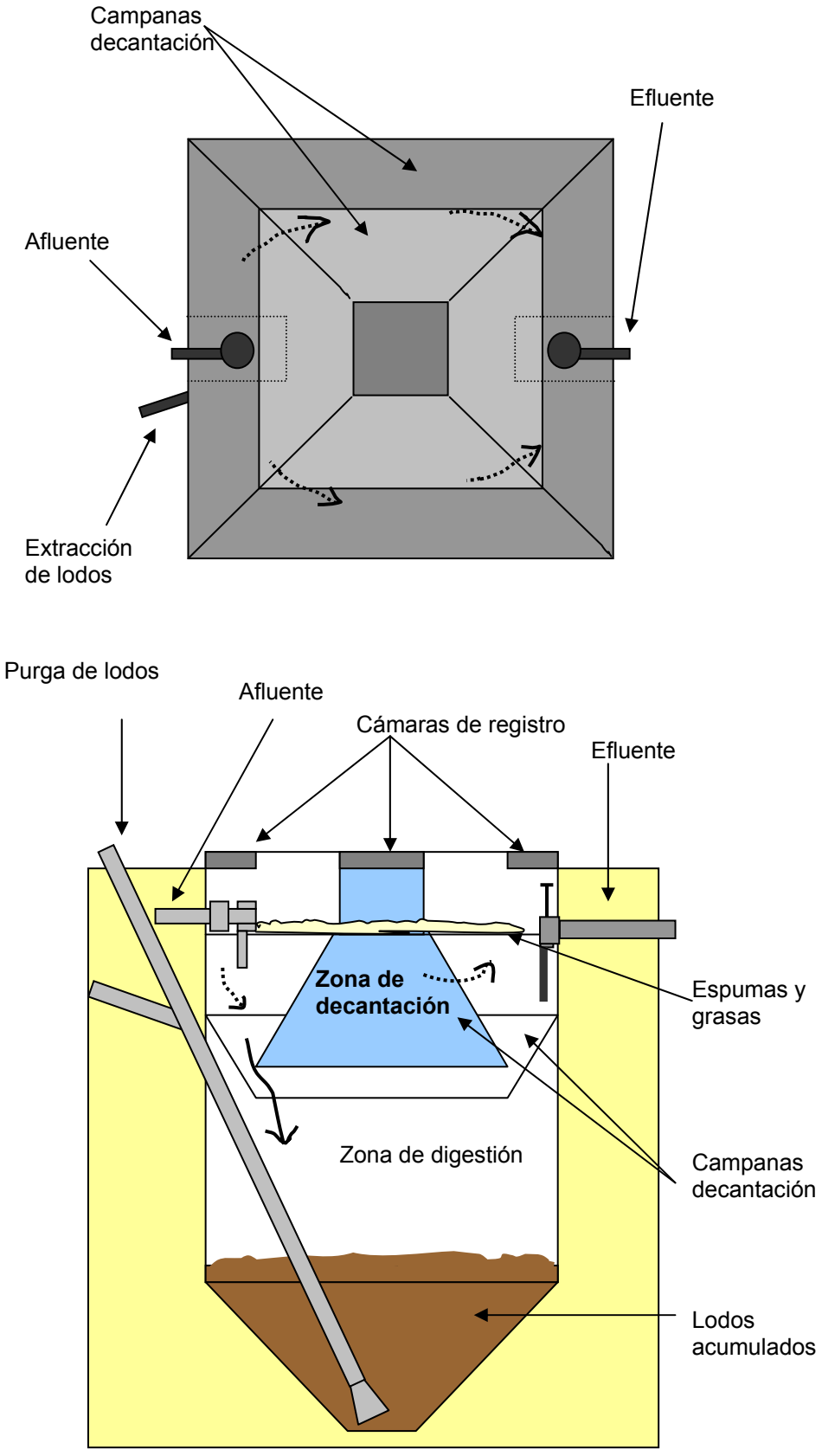


Figura N° 4: Tanque imhoff enterrado. Vista de planta y lateral

→ Flujo de los sólidos; ⇢ Flujo de los líquidos

Como se muestra en la Figura N° 4, los sólidos pasan a través de una apertura situada en la parte inferior de la cámara de sedimentación al compartimiento inferior para su digestión sin calentamiento. La acumulación de espumas se produce en la cámara de sedimentación. El tanque imhoff esta provisto de un venteo para los gases producidos durante la digestión en el compartimiento inferior. En su parte inferior existe una abertura que comunica a los dos niveles impidiendo el paso de los gases producidos en la digestión y las partículas de lodos que tienden a ascender desde el fondo. Los tanques imhoff no calentados convencionales sueles ser fabricados en hormigón y de forma rectangular, aunque también se han empleado tanques circulares de pequeñas dimensiones. (Castro, F.; Olivares, G., 2003)

Tabla 12: Rendimiento esperado en un tanque imhoff

Parámetro	DBO_5	SST	NTK	P total	Coliformes	TRH
Remoción	30 - 55%	37 – 82%	0 – 10%	0 – 10%	1 – 2 (elim.. log)	2 - 4 horas

Fuente: (Castro, F. ; Olivares, G., 2003)

Humedales

Este sistema natural de aplicación superficial o subsuperficial de depuración de agua residual se realiza a través del terreno, al que otorga un potencial aprovechamiento agrícola o forestal. Todos los tipos de tratamiento natural están siempre precedidos por algún pretratamiento mecánico, o como mínimo alguna operación de tamizado o de sedimentación primaria para eliminar los sólidos gruesos que pueden obstruir los sistemas de distribución.

Los humedales naturales existentes en las zonas húmedas en presencia de agua, luz, nutrientes y vegetación, son considerados unos de los sistemas más productivos de biomasa de la tierra. La alta productividad de estos ecosistemas supone una gran actividad microbiana y por tanto una gran capacidad para descomponer la materia orgánica, con producción media de 2000 (g/m^2*año). Aunque los humedales naturales como los artificiales, también llamados *wetlands,* han sido utilizados para el tratamiento de

aguas residuales, el uso indiscriminado de humedales naturales para el vertido de aguas residuales supone en la mayoría de los casos su deterioro, lo que hace necesario la implementación de zonas húmedas especialmente diseñadas para este fin.

El humedal puede ser considerado como un reactor biológico tipo "proceso biopelícula sumergida", con aireación natural, en el que las plantas emergentes ingresan el oxígeno a través de su parte aérea para introducirlo en la zona sumergida mediante los rizomas (tallos subterráneos). Se crea un mosaico de zonas aerobias y anaerobias próximas entre si, que se produce en el relleno donde crecen los juncales, favoreciendo los procesos de descomposición de la materia orgánica, nitrificación, desnitrificación, precipitación de fosfatos y muerte de patógenos. Un esquema de tratamiento de humedales se muestra en la Figura N° 5

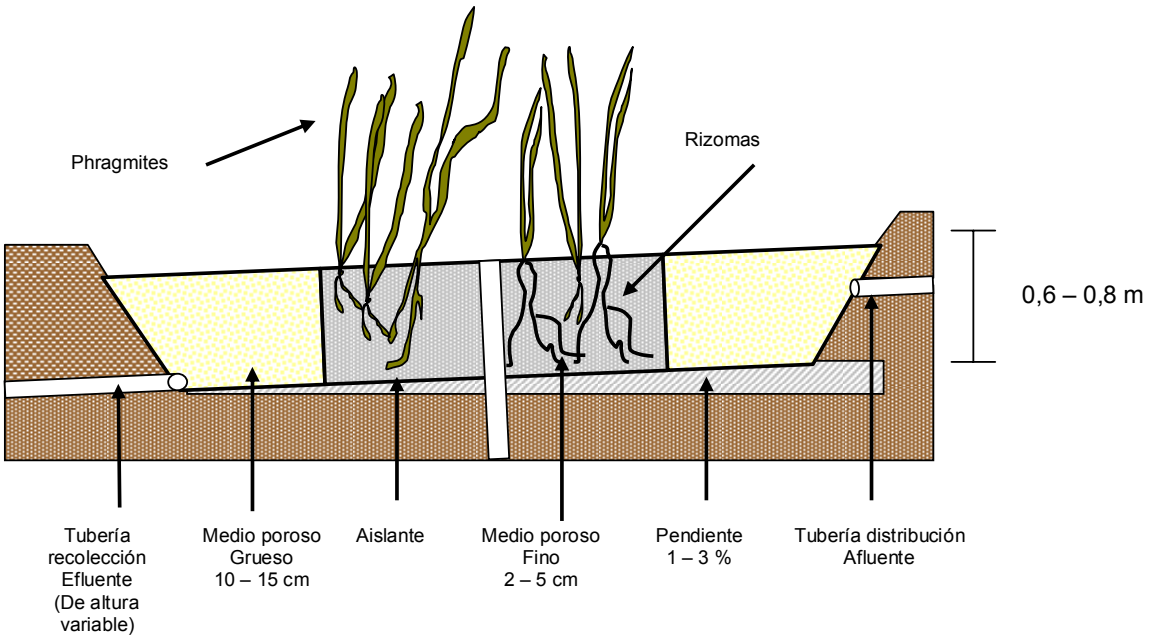


Figura N° 5: Sección transversal de un humedal con flujo subsuperficial.

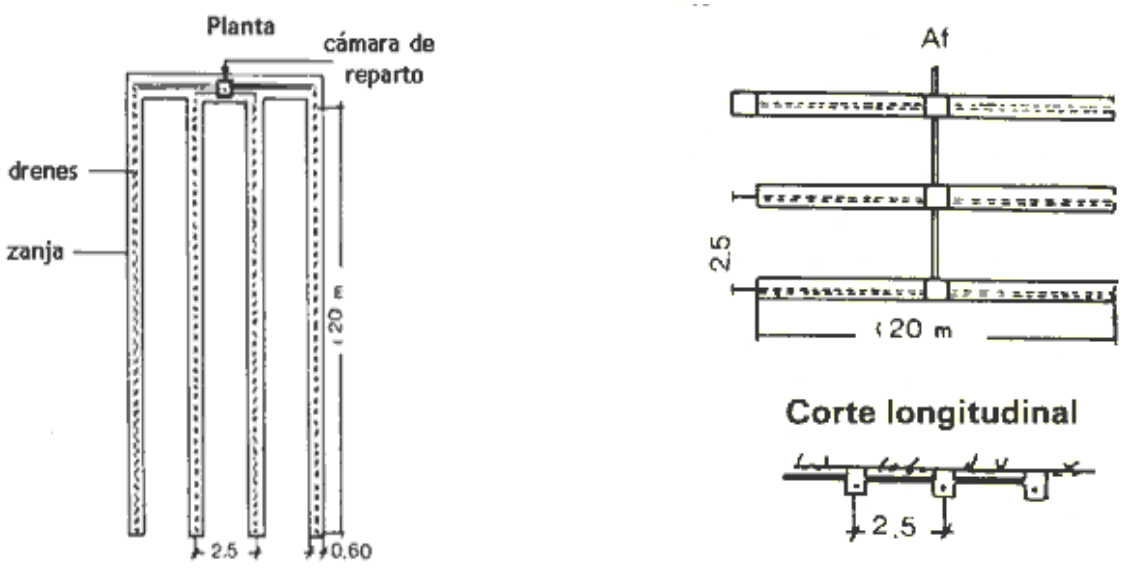
Tabla N° 13: Rendimiento esperado en un humedal artificial

Parámetro	DBO_5	TRH
Remoción	80%	5,2 dias

Fuente: (Castro, F. ; Olivares, G., 2003

Zanjas de Infiltración

Se trata de zanjas de poca profundidad (<1,0 (m)) y anchura (0,45 – 1,2 (m)) escavadas en el terreno, que recogen y distribuyen las aguas residuales pretratadas, a través de una tubería agujereada o zanjas especialmente construidas, colocadas sobre un lecho de arena y cubierta de gravas. La grava se cubre con un relleno vegetal, de forma que no se mezcle ni atasque el espacio ocupado por la capa de grava. La superficie de infiltración está constituida en el fondo de la zanja, aunque en el caso de posible atascamiento, las paredes verticales pueden ayudar a la infiltración.



(a) (b)

Figura N° 6: (a) Zanjas filtrantes con cámara de reparto y disposición de drenes; (b) corte longitudinal de las zanjas de infiltración.

Pozos de infiltración

Es un sistema de aplicación subsuperficial que presenta más dificultades de construcción que las zanjas, aunque los efluentes obtenidos son de gran calidad. Están indicados cuando el nivel freático está a más de 4 (m) de profundidad, y en tal caso pueden construirse pozos que expongan de una gran superficie vertical respecto de la horizontal. De esta forma se ocupa menos superficie de terreno que las zanjas.

Este sistema es el más utilizado en nuestro país, y son construidos generalmente de sección cónica, con un enlozado interior y con un soporte en base a piedras en el fondo, que reduce los posibles atascamientos.

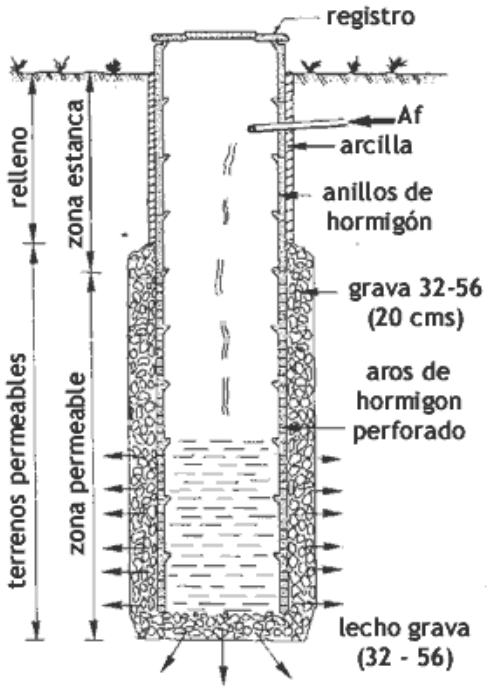


Figura N° 7: Esquema de pozo filtrante

Sistemas biológicos rotativos de contactos (Biodiscos)

Un reactor biológico rotativo de contacto consiste en una serie de discos circulares de poliestireno o cloruro de polivinilo, situado sobre un eje a corta distancia unos de otros. Los discos están parcialmente sumergidos en el agua residual y gira lentamente en el

seno de la misma. En el funcionamiento de un sistema de este tipo, los crecimientos biológicos se adhieren a las superficies de los discos, hasta formar una película biológica sobre la superficie mojada de los mismos. La rotación de los discos pone la biomasa en contacto, de forma alternativa, con la materia orgánica existente en el agua residual y con la atmósfera, para la adsorción de oxigeno. La rotación del disco induce la transferencia de oxigeno y mantiene la biomasa en condiciones aerobias. La rotación, también es el mecanismo de eliminación del exceso de sólidos en los discos por medio de los esfuerzos cortantes que origina y sirve para mantener los sólidos arrastrados, de modo que puedan ser transportados desde el reactor hasta el verificador. (Metcalf y Eddy. 1995)

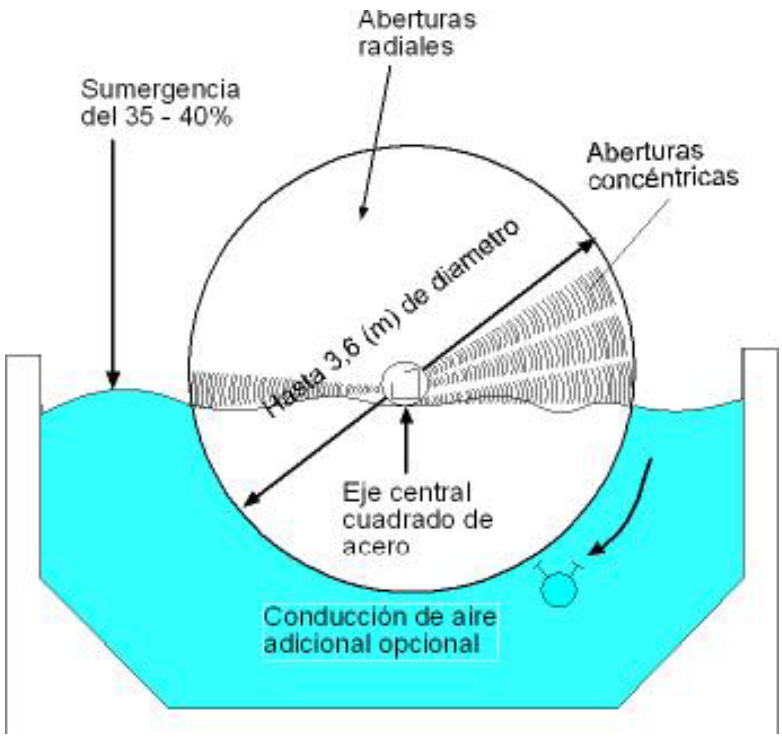


Figura N° 8: Biodisco convencional con accionamiento mecánico y alimentación de aire opcional

Lagunaje

El proceso de lagunaje como depuración de aguas residuales, se viene empleando desde hace unos 3000 años. Las primeras lagunas para depuración fueron embalses construidos como sistemas reguladores como agua para riego. En ellos se almacenaban los excedentes de agua residual utilizada en riegos directos, sin tratamiento previo. En el curso de dicho almacenamiento se observo que la calidad del agua mejoraba sustancialmente, por lo que comenzó considerarse como sistema de depuración de aguas residuales. (Castro, F.; Olivares, G., 2003)

Clases de lagunas

Las lagunas usadas en el tratamiento de aguas residuales poseen una profundidad variable, pueden ser poco profundas o bastantes hondas. Las lagunas se clasifican teniendo en cuenta la concentración de oxígeno disuelto, y la fuente que suministra el oxígeno necesario para la asimilación bacterial de compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales.

Los cuatro tipos de lagunas más importantes son: (Crites y Tchobanoglous. 2000)

- Lagunas aerobias: las lagunas aerobias son bastantes profundas para permitir la penetración de la luz del sol en toda la comuna de agua. Como resultado, este tipo de lagunas tiene una gran actividad fotosintéticas durante la horas de luz solar en toda la columna de agua; su profundidad varia entre 0,3 t 0,6 (m). Las lagunas diseñadas para aumentar la actividad fotosintética de las algas se denominan también lagunas de alta tasa. El termino alta tasa se refiere a la velocidad de producción fotosintéticas de oxígeno por parte de las algas presentes, y no a la velocidad de asimilación metabólica de compuestos orgánicos, la cual permanece invariable. El oxígeno producido por las algas permite a las bacterias degradar en forma aerobia los compuestos orgánicos presentes en el agua residual. Durante las horas de luz solar, el oxígeno y el pH aumentan alcanzando valores máximos, mientras que en las horas de oscuridad dichos parámetros disminuyen en forma

considerable respecto del valor máximo. Los tiempos de retención de estos sistemas son relativamente cortos (valor usual, 5 (d)).

- Lagunas facultativas: son las más usadas y versátiles entre las diferentes clases de lagunas. En general, su profundidad oscila entre 1,5 y 2,5 (m), y se conocen también como lagunas de estabilización. El tratamiento se desarrolla por acción de bacterias aerobias en la capa superior y de bacterias anaerobias en la capa inferior, dependiendo de la mezcla que se induce por acción del viento. Los sólidos sedimentables se depositan en el fondo de la laguna. En las lagunas facultativas es esencial la presencia de algas ya que son la principal fuente de oxígeno, aunque también actúa el mecanismo de reaireación en la superficie. Ya que las algas necesitan luz para su función y la difusión de oxígeno en aguas es lenta, las lagunas tienen una profundidad reducida para facilitar un ambiente oxigenado y de fácil acceso de la luz, aunque la penetración efectiva de la luz puede ser inferior a 1 (m).

- Lagunas aireadas con mezcla parcial: estas son más profundas y pueden recibir mayor carga orgánica que una laguna facultativa. El suministro de oxígeno se realiza por medio de airedores mecánicos flotantes o difusores de aire sumergidos. Las lagunas aireadas tienen una profundidad que varia entre 2 y 6 (m), y se diseñan con bajo tiempo de retención de 3 a 20 (d). La principal ventaja de la laguna aireada radica en que necesita menor área que los otros sistemas de lagunas. (Crites y Tchobanoglous. 2000)

- Lagunas anaerobias: estas se diseñan para el tratamiento de residuos líquidos con alto contenido de materia orgánica, generalmente aguas residuales de industrias ubicadas en zonas rurales apartadas. Estas lagunas no cuentan con zonas aerobias, su profundidad oscila entre 5 y 10 (m), y su tiempo de retención va de 20 a 50 (d). Las lagunas actúan como un digestor anaerobico abierto sin mezcla y debido a las altas cargas orgánicas que soportan, el efluente contiene un alto porcentaje de materia orgánica y requiere de otro proceso complementario de tratamiento.

III
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

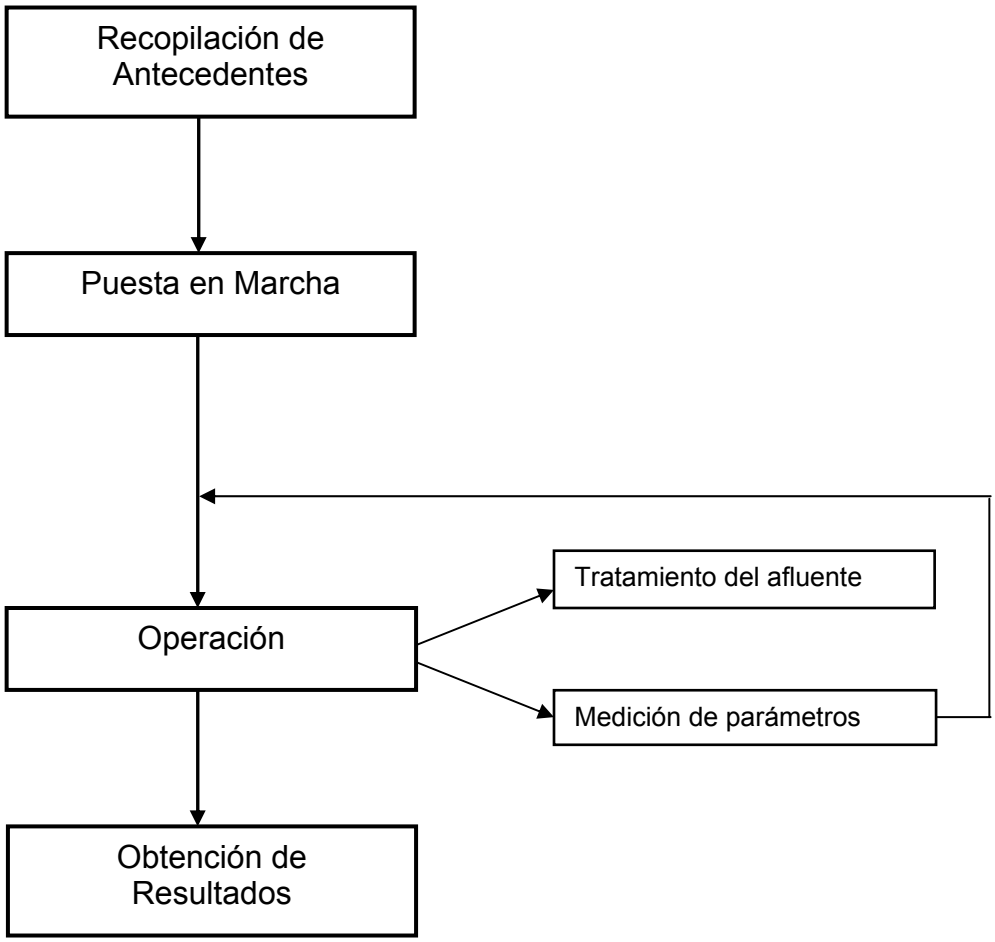


Figura N° 9: Esquema metodología experimental

3.1.1. ETAPA Nº 1: PUESTA EN MARCHA

La puesta en marcha del Lombrifiltro demoró alrededor de tres semanas, en las que se reorganizó el sistema ya existente en el Colegio Nueva América de Viña del Mar. Se realizó en aquel lugar ya que contaba con la estructura metálica del lombrifiltro, debido a que el colegio realizó un proyecto Explora CONICYT durante el año 2005, proyecto que tenía como objetivo educativo, mostrar a los niños participantes el funcionamiento de un lombrifiltro en el tratamiento de agua.

En la primera semana de puesta en marcha, se realizó la revisión de material del lombrifiltro y de las estructuras existentes, además del conteo y la medición de la biomasa de las lombrices. Las dimensiones de la estructura metálica era: 1 (m) de alto, 60 (cm) de ancho y 70 (cm) de profundidad, donde tres paredes laterales y el fondo eran de policarbonato, y la pared frontal era de acrílico (usado por su transparencia).

El lecho del lombrifiltro se dividía en 5 centímetros de humus con 600 lombrices, 50 (cm) de aserrín y 25 (cm) de gravilla. Como se muestra en la Figura N° 10: Esquema del Lombrifiltro)

Las siguientes dos semanas se realizó la estabilización del sistema, tiempo necesario para lograr la cantidad requerida de lombrices en el lombrifiltro y su adaptación al cambio de alimento. El incremento en la concentración de la materia orgánica y de los nutrientes, fue paulatina, dependiendo directamente de la eficiencia en la remoción de estos. El aumento se realizó cuando la remoción de estos parámetros alcanzó un promedio aproximado del 85%, así sucesivamente hasta llegar a una concentración de 400 mgDQO/L, 50 mgNamo/L y 5 mgP/L.

.

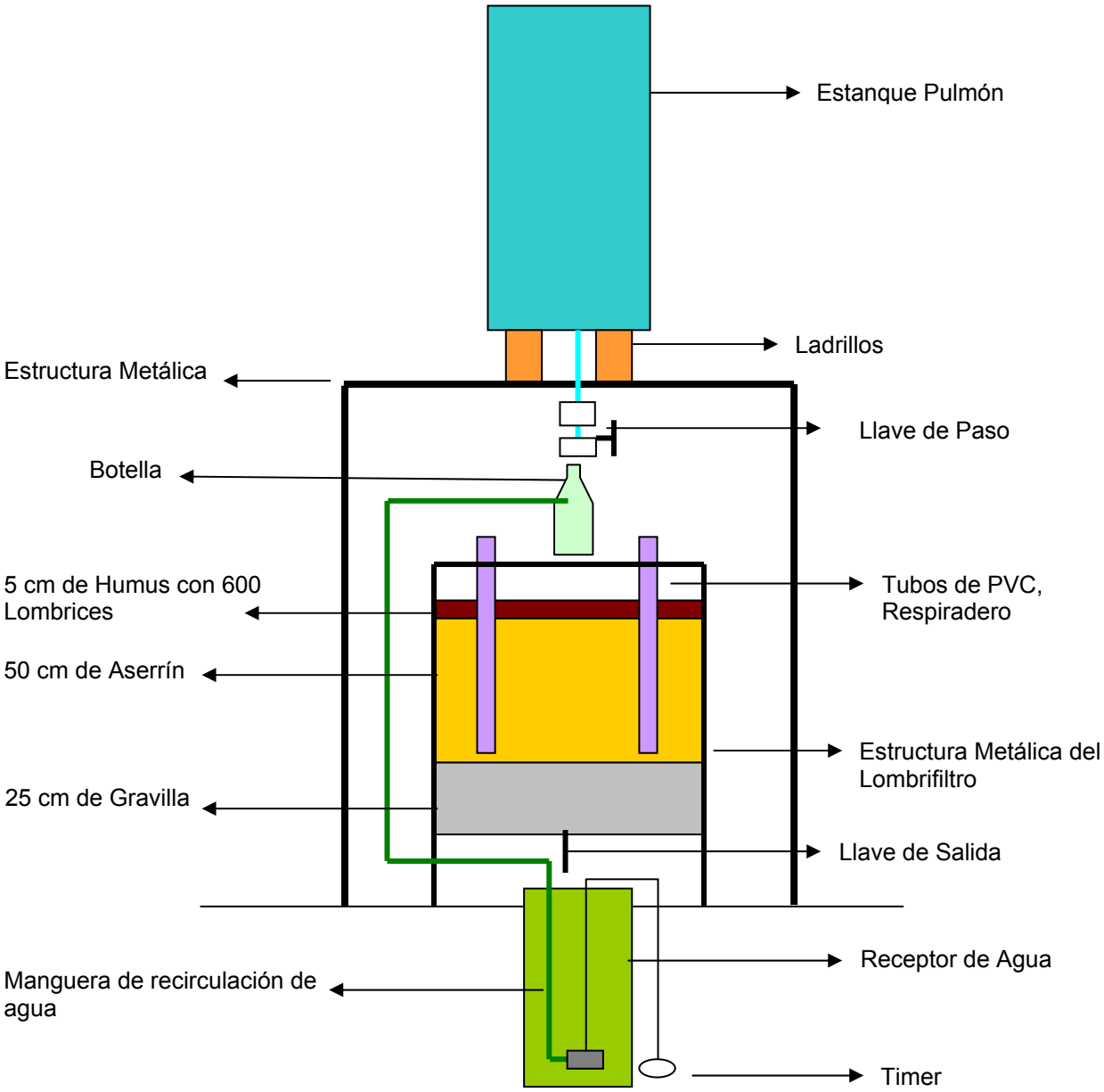


Figura N° 10: Esquema del Lombrifiltro

La población inicial de lombrices fue de 600 individuos, de los cuales 200 eran adultas y 400 juveniles. Se calculó, que para la población inicial de 600 lombrices, se obtendrían entre 3.000 y 20.400 ejemplares, durante el periodo de investigación. La producción de lombrices podrá ser utilizada en otros procesos biológicos como tratamiento de lodos, o producción de humus. La Tabla N° 14 muestra la producción teórica de lombrices.

Tabla Nº 14: Producción teórica de lombrices

	Adultas inicial							
	200							
Cada lombriz adulta puso entre 7 y 11 huevos en un periodo de 75 días (a)	7				11			
Eclosiones por lombriz (b)	3		5		3		5	
Total teórico de huevos durante el periodo de investigación	600		1000		600		1000	
Total teórico de lombrices hijas (c)	2400	12000	4000	20000	2400	12000	4000	20000
Total teórico de lombrices hijas + juveniles iniciales	**3000**	12400	4400	**20400**	3000	12400	4400	20400

(a) Cada lombriz pone una capsula cada 7 a 10 dias
(b) La eclosión del huevo se realiza entre 14 y 21 días
(c) Cada capsula contiene entre 4 y 20 lombrices

Se simuló un efluente de agua residual para manejar las concentraciones de la carga orgánica y de los nutrientes, calculando el volumen, el caudal y la concentración de éste. Para lograr la concentración de DQO necesaria se utilizaron los siguientes compuestos: sacarosa (azúcar), almidón (chuño), gelatina y aceite, los dos primeros aportan carbohidratos, el tercero las proteínas y el cuarto las grasas. Se analizó la DQO por su facilidad de análisis, en comparación con la DBO_5, que necesita de cinco días para obtener resultados v/s las dos horas que se requieren para obtener los datos de DQO; para lograr la concentración de fósforo total necesaria se utilizó el fosfato de potasio como reactivo simulador; y para lograr la concentración de nitrógeno amoniacal se utilizó, al comienzo, urea y después cloruro de amonio. Tabla Nº 15 muestra las concentraciones de nutrientes en el efluente urbano simulado.

La simulación del efluente se debió a dos motivos: (1) al estar la estructura en el Colegio Nueva América, en la sección del jardín infantil, no se podía arriesgar la salud de los infantes que utilizaban en lugar como patio de recreo, tratando aguas proveniente del alcantarillado; (2) al ir aumentando gradualmente las concentraciones de la materia orgánica y de los nutrientes, los investigadores debían manejar estas para no colapsar el

lombrifiltro y facilitar el trabajo; y (3) se aseguraba que todas las características importantes o propiedades permanecieran controladas a lo largo de la experimentación.

Tabla Nº 15: Concentración de Nutrientes en Efluente Urbano Simulado

Nutrientes				**Concentración (mg/l)**
DQO				**400**
	%	***Compuesto***	***Concentración aportada por el compuesto a la DQO(mg/l)***	***mg/l del compuesto***
	50	Sacarosa	200	178,5
	30	Almidón	120	109,1
	10	Aceite	40	13,9
	10	Gelatina	40	34,5
	TOTAL		**400**	
Nitrógeno Amoniacal				**50**
	%	***Compuesto***	***Concentración aportada por el compuesto al Nitrógeno Amoniacal (mg/l)***	***mg/l del compuesto***
	100	Urea	50	107
	100	NH_4Cl	50	191
Fósforo				**5**
	%	***Compuesto***	***Concentración aportada por el compuesto al Fósforo (mg/l)***	***mg/l del compuesto***
	100	K_2HPO_4	0,4	**2,2**

Tabla Nº 16: Aporte de DQO de los Compuesto Usados en el Efluente urbano Simulado

DQO	%	Aporte en g DQO/g compuesto
Carbohidratos	**80**	
Almidón (chuño)	30	1,10
Sacarosa (azúcar)	50	1,12
Aceites y grasas	**10**	
Aceite		2,87
Proteínas	**10**	
Gelatina s/sabor		1,16

Fuente: Sanders, W. 2001

La alimentación del lombrifiltro se realizó por lotes, pasando 100 (L) de agua en un periodo de tres horas durante las mañanas, aproximadamente cinco días a la semana. El plan de trabajo muestra el incremento en la masa de los nutrientes utilizados para lograr las concentraciones necesarias del efluente simulado. Este aumento se realizó gradualmente, un vez que el sistema lograba una remoción adecuada (app. 85%).

Los porcentajes de concentraciones que se pretendió alcanzar, fueron 20%, 30%, 40%, 50%, 75% y 100%, de los datos obtenidos bibliográficamente (400 (mgDQO/l), 50 (mg N amoniacal/l) y 5 (mg P/l)), como se muestra en la Tabla N° 17.

Tabla Nº 17: Porcentaje de concentraciones utilizadas en el efluente urbano simulado arreglar

Nutrientes				Concentración (mg/l)	Porcentaje de masa (g) del compuesto						
DQO				400							
	%	*Compuesto*	*Concentración aportada por el compuesto a la DQO (mg/l)*	*mg/l del compuesto*	*Masa (g) en 100 (L)*	*20%*	*30%*	*40%*	*50%*	*75%*	*100%*
	50	Sacarosa	200	178,5	*17,85*	3,57	5,36	7,14	8,93	13,39	17,85
	30	Almidón	120	109,1	*10,91*	2,18	3,27	4,36	5,46	8,18	10,91
	10	Aceite	40	13,9	*1,39*	0,28	0,42	0,56	0,7	1,04	1,39
	10	Gelatina	40	34,5	*3,45*	0,69	1,04	1,38	1,73	2,59	3,45
	TOTAL		**400**								
Nitrógeno Amoniacal				**50**							
	%	*Compuesto*	*Concentración aportada por el compuesto al Nitrogeno Amoniacal (mg/l)*	*mg/l del compuesto*							
	100	NH_4Cl (Cloruro de amonio)	50	191	*19*	3,8	5,70	7,6	9,5	14,25	19
Fósforo				**5**							
	%	*Compuesto*	*Concentración aportada por el compuesto al Fósforo (mg/l)*	*mg/l del compuesto*							
	100	K_2HPO_4 (Fosfato de potasio)	0,4	2,2	*0,22*	0,04	0,07	0,09	0,11	0,17	0,22

Se utilizó una bomba de agua sumergible (Astro Bomba de agua 2000), para la recirculación. Esta se efectuó con el fin de evitar la deshidratación del lecho, proporcionar alimento a las lombrices y a los microorganismos degradadores asociados. Para ello se ocupó un timer (reloj análogo programador) que reguló el caudal, proveniente del estanque pulmón, durante la caída al lecho. Este, además se hizo funcionar dos veces durante la tarde por 15 (min), para mantener la humedad y una temperatura adecuada para la sobrevivencia de las lombrices.

El volumen por unidad de área fue de 100 (L), ya que, 1 (m^2) de superficie del lombrifiltro puede tratar hasta 1 (m^3) de agua por día máximo, alcanzando su mayor efectividad cuando trata la mitad de éste volumen. (Ilustre Municipalidad de Rinconada de

Los Andes, 2001) El área superficial de trabajo experimental es de 0,42 (m^2), pudiendo tratar efectivamente hasta 210 (L) de agua.

Tabla N' 18: Carga orgánica por unidad de área media teórica

% de Concentración	Concentración DQO (mg/l)	Carga Contaminante (kg/día)	Carga Orgánica Superficial (kg/m2*día)
20	80	0,008	0,003
30	120	0,012	0,005
50	200	0,020	0,008
75	300	0,030	0,013
100	400	0,040	0,017

La determinación área de ventilación es fundamental para el buen funcionamiento del lombrifiltro. Según los datos teóricos obtenidos en la memoria de cálculo de proyecto de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas población Mina Caracoles, cada 23 m^2 de superficie de filtro, se debe tener 0,10 m^2 de ventilación.

$$\frac{0{,}10(m^2)ventilación}{23(m^2)filtro} = \frac{X(m^2)ventilación}{0{,}42(m^2)filtro}$$

X = 0,0018 (m^2) ventilación teórico

Para lograr la ventilación necesaria se utilizaron dos tubos de aireación (PVC) de 40 (mm), con orificios de 4 (mm) de diámetro en toda su extensión. La distribución de los tubos de aireación se muestra en la Figura N° 11.

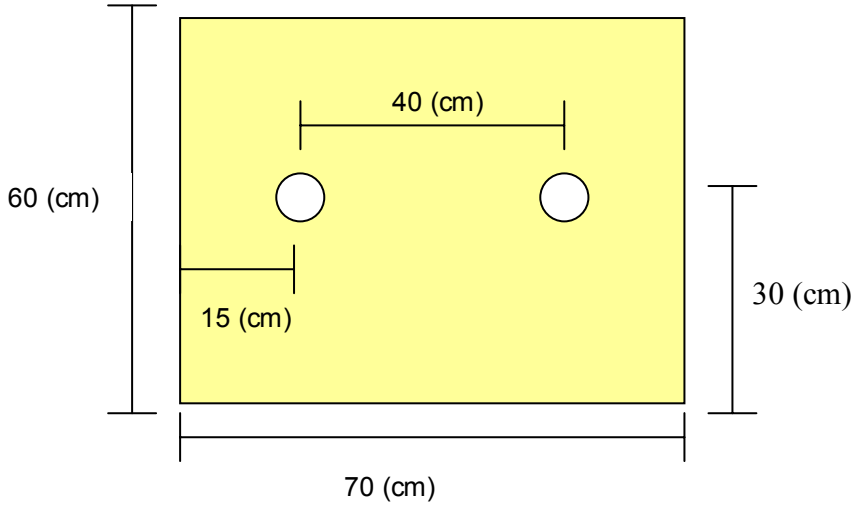


Figura N° 11: Distribución de los tubos de aireación en la lombrifiltro

- Área principal

  Diámetro del PVC = 40 (mm) (0,04 (m))

  Área principal = 0,0012 (m^2) ventilación

- Área secundaria, la cantidad de orificio es igual a 100, donde cada uno tiene un diámetro de 4 (mm) = 0,004 (m)

  Área secundaria = 0,0013 (m^2) ventilación

  Área total = área principal + área secundaria

  Área total de ventilación = 0,0025 (m^2)

La mantención de la superficie del lombrifiltro se realizó una vez a la semana, para mantener la buena permeabilidad del lombrifiltro e impedir la aparición de vegetación en la superficie y aposamiento de aguas.

El estanque del afluente, será limpió cada vez que se realizó cambio de concentración de reactivos, para obtener mayor veracidad en los análisis.

3.1.2. ETAPA Nº 2: OPERACIÓN

La etapa de operación tuvo una duración aproximada de 15 semanas, incluyendo el periodo de estabilización. En estas semanas, el trabajo realizado constó de varias etapas:

1) Mantención del sistema: en esta etapa se realizaba la limpieza del estanque pulmón, del receptor, de la manguera, del sistema de riego, etc. Además el horqueteo en el lecho, para evitar aposamientos de agua en la superficie de este, manteniendo la permeabilidad del sistema e impedir la aparición de la vegetación. Al final se revisaba el sistema de recirculación de agua que iba desde el estanque receptor al sistema de riego, limpiando la bomba y programando el timer. Aproximadamente entre las semanas 8 y 10, previo al horqueteo, se agregó aserrín, para mantener el volumen del lombrifiltro constante.

2) Preparación del efluente a tratar: en esta se mezclaba los nutrientes con el agua –aproximadamente 100 (L)- en el estanque pulmón, tratando de que sea los más homogéneo posible.

3) Toma de muestra y medición de parámetros físicos: antes de que el efluente urbano simulado pasara por el lecho del lombrifiltro y a la salida de este, se tomaron muestras del agua, para analizar por duplicado las concentraciones de DQO, Nitrógeno amoniacal y Fósforo. Además de las mediciones de parámetros físicos en el estanque pulmón. La tabla N° 19, muestra la frecuencia en que se realizaron los análisis.

Tabla Nº 19: Análisis y Frecuencia de Medición de Parámetros

Análisis	Frecuencia
DQO	Dos veces por semana
Nutrientes (N, P)	Dos veces por semana
Sólidos en Suspensión	Tres veces por semana
Oxígeno Disuelto	Tres veces por semana
pH	Tres veces por semana
Temperatura	Tres veces por semana

*La totalidad de los análisis se realizaron durante un periodo de 15 semanas.

4) Análisis de muestras en laboratorio: luego de al toma de muestra, estas se analizaron de acuerdo a lo establecido en el Método Estándar para el Examen de Agua de Desechos (APHA).

Parámetros de calidad del agua

Se midieron los parámetros de calidad del agua que se indican a continuación:

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

El ensayo de la DQO determina la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente la materia orgánica presente en una muestra de agua mediante un oxidante químico fuerte (normalmente dicromato de potasio) y a una temperatura de 150ºC.

Los resultados de la DQO siempre son mayores que los de la DBO_5 debido a que el número de compuestos que se pueden oxidar químicamente es mayor que el de oxidables biológicamente. La DBO_5 es aproximadamente el 60% de la DQO en aguas urbanas. (Corbitt, R. 2003)

La composición del agua servida indicada en el Decreto N° 609 (Tabla Nº 7), indica la cantidad de DBO_5 presente en el efluente, por lo que para relacionar la DBO_5 con la DQO se realizó una medición inicial de ambos parámetros y a partir de los resultados se podrá obtener la proporción real DBO_5/DQO.

La duración del ensayo para determinar DQO, generalmente es de 2 horas, lo cual ofrece una ventaja respecto a la DBO_5, la que tiene un periodo de espera de cinco días para obtener un resultado y la necesidad de disponer de una elevada concentración de bacterias activas y aclimatadas que desarrollen el papel de inóculo y la necesidad de pretratamiento del agua cuando haya sustancias tóxicas. (Corbitt, R. 2003)

- **Nitrógeno**

Para determinar la presencia de nitrógeno, tanto en el afluente como en el efluente, se medió el nitrógeno amoniacal presente.

El nitrógeno amoniacal se encuentra presente, en concentraciones variables, en aguas superficiales y en aguas profundas. Cuando se encuentra en aguas superficiales se acepta que el nitrógeno amoniacal es una evidencia química de contaminación sanitaria.

La determinación de N- NH_3 es por el método del Fenato, este consiste en tomar muestras del afluente y efluente, filtrando este último para realizar una curva con distintas soluciones, luego de esperar una hora aproximadamente, se lee en un colorímetro a 640 nm.(APHA. 1963)

- **Fósforo**

Para determinar el fósforo presente en el agua, se midió la presencia de fósforo total en las aguas.

El fósforo que se encuentra en las aguas superficiales, proviene de aguas negras, crudas o depuradas, drenajes agrícolas e industriales y aguas domesticas. En el caso del agua residual urbana simulada, el fósforo proviene del fosfato de potasio (K_2HPO_4).

Los análisis de fósforo total sirven para el control de la dosificación de productos químicos o rastrear corrientes de contaminación.

La metodología a utilizar es mediante una curva, que es leída en el colorimétrico, a una longitud de onda de 690 nm. (APHA. 1963)

- **Oxígeno Disuelto y pH**

Para las mediciones de pH y oxígeno disuelto, existen equipos que las realizan instantáneamente, basta poner en contacto una sonda en el agua y la medición se obtendrá en un par de minutos. Este método se utiliza si se quiere obtener medidas muy precisas y puede aplicarse a cualquier caso particular.

El oxígeno disuelto es el oxígeno libremente disponible en el agua y se relaciona estrechamente con la DQO y la temperatura.

pH tiene un efecto en muchas fases del proceso de tratamiento de las aguas y afecta a la formación de costras de las fuentes de aguas.

- **Conductividad**

La conductividad, es un parámetro de importancia para determinar la aptitud de un agua residual para su uso en sistemas de riego, ya que es un indicador de sales disueltas o minerales en el agua. (Metcalf y Eddy. 1996)

- **Sólidos en suspensión.**

Son importantes por razones estéticas y porque pueden originar depósitos de lodos y condiciones anaerobias. (Corbitt, R. 2003)

3.2. METODOLOGÍA ANALÍTICA

3.2.1. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (APHA, 1963)

Reactivos:

1. Solución valorada de dicromato de potasio 0,25N. Se disuelve en agua destilada 12,29g de $K_2Cr_2O_7$, previamente secado a 110 °C por 2 horas, diluir a 1 litro con agua destilada en un matraz aforado.

2. Solución valorada de sulfato ferroso pentahidratado 0,25N, se disuelven 69,48g de $FeSO_4*7H_2O$ en agua destilada, agregar 20 ml de H_2SO_4 concentrado y diluir en un litro de agua destilada en matraz aforado.

3. Solución indicadora de ferroína. Se disuelve 1,485g de 1,10-fenantrolina y 0,695g de $FeSO_4*7H_2O$ en agua destilada, diluir a 100ml.

Procedimiento:

1. Se vierten 25ml aforados de muestra en un balón, agregar 5ml de dicromato potásico a 0,25N. Luego agregar con mucho cuidado 30ml de ácido sulfúrico concentrado mezclando bien después de cada adición.

2. Someter la mezcla a reflujo por una hora.

3. Luego enfriar la solución, trasvasijar a un matraz erlenmeyer de 250ml, lavar el refrigerante con un poco de agua destilada.

4. Se titula la muestra con la solución valorada de sulfato ferroso 0,25N, agregar 3-4 gotas del indicador de ferroína, valorar hasta el viraje del indicador que pasa de color verde azulado a rojo, lo que indica el punto final de valoración.

5. Del mismo modo se trata un testigo con agua destilada y todos los reactivos, excepto la muestra.

Estandarización de $FeSO_4*7H_2O$, 0,25N.

- Secar en la estufa a 105 °C $K_2Cr_2O_7$.
- Pesar 100mg de $K_2Cr_2O_7$ y diluir a 100ml con agua destilada.
- Agregar 10ml de H_2SO_4 concentrado.
- Agregar a la solución 3-4 gotas del indicador de ferroína.
- Titular la solución con el sulfato ferroso hasta viraje del indicador que pasa por verde azulado a rojo.
- Anotar el gasto de sulfato ferroso.

Cálculos

$$mg/l(DQO) \equiv \frac{(A-B)*C*P.E*1000}{(ml)muestra}$$

Donde:

A= ml sulfato para la muestra

B= ml sulfato para el testigo

C= Normalidad del $FeSO_4*7H_2O$

P.E.= Peso equivalente del O_2 = 8

3.2.2. Determinación de Fosfato y Fósforo Total Mediante el Método Colorimétrico del Cloruro Estanoso para Ortofosfatos en Aguas. (APHA, 1963)

Principio: es el mismo que el método A, con la modificación de que el acido amino-naftol-sulfónico se sustituye, como agente reductor, por el cloruro estanoso.
Este cambio aumente la sensibilidad de método del azul de molibdeno y también hace posible la extracción, aumentando la seguridad del método a concentraciones, inferiores a 0,1mg/l y reduciendo también la interferencia.

Método A "método colorimétrico, con acido amino-naftol-sulfónico para ortofosfato"
Prinicipio: en una solución diluida de fosfato, el molibdato de amonioreaciona en un medio ácido para formar un ácido complejo ácido fosfomolíbdico, que se reduce a un complejo intensamente colorido, un Azul de molibdeno, por combinación con el ácido amino-naftol-sulfónico y los sulfitos reductores.

Reactivos:

1. Solución estandar de fosfato de 500 ppm. Se disuelven 0,05g de ortofosfato monopotásico (KH_2PO_4), previamente secado en estufa a 105 °C., en 100ml de agua destilada.

2. Solución madre de fosfato. Se diluyen 1ml de la solución estándar de fosfato a 100ml con agua destilada (para concentraciones bajas).
3. Solución acidoconcentrada de molibdato de amonio. Se disuelven 25g de $(NH_4)_6MO_7O_{24}*4H_2O$ en 175ml agua destilada. Se enfría, se agrega la solución de molibdato y se diluye a 1 litro.

4. Solución de cloruro estanoso. Se disuelven 2,5g de $SnCl_2*2H_2O$ en buen estado, en 10ml de HCl concentrado y se diluye a 100ml con agua destilada. Este reactivo se debe preparar en el momento.

5. Solución acido concentrada. Se vierten lentamente unos 300ml de ácido sulfúrico concentrado, a unos 600ml de agua destilada. Se enfría la solución, se agregan 40ml de HNO_3 concentrado, y se diluye a 1 litro.

Procedimiento:

- Preparación de la curva de calibración:

1. Tome alícuotas de la solución estándar, con contenidos de fosfato que van entre 25 y 100*u*g, dilúyalos a 100ml de agua destilada y trátelos del mismo modo que las muestras.

2. Haga un blanco que contenga 100ml de agua destilada y todos los reactivos menos la muestra.

- Tratamientos de las muestras

1. Tome 100ml de muestra o una alícuota que no contenga más de 100*u*g de fosfato, diluya a 100ml con agua destilada.

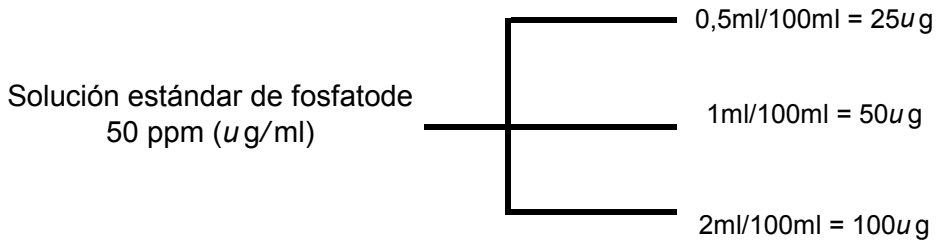
2. Agregue 1 gota de fenolftaleina si la solución se torna rosada, agregue la solución ácido concentrado, hasta que la solución se vire a incolora.

3. Agregue 4 gotas de la solución de molibdato de amonio, agite suavemente.

4. luego agregue 0,5ml de la solución de cloruro estanoso, agite suavemente. Espere por 10 minutos el desarrollo del color.

5. Lea la absorbancia de los estándares y de las muestras a 690 nm, después de 10 minutos y antes de 12 minutos, contra un testigo de agua destilada.

Curva de calibración



3.2.3. Determinación de N-NH_3, Método del Fenato (APHA, 1963)

Principio: Un intenso color azul compuesto, indofenol, y se forma por la reacción de hipoclorito de amonio y fenol, catalizado por el nitroprusiato de sodio.

Reactivos:

1. Solución fenol. Pese 12g de fenol y dilúyalos a 100ml con alcohol al 95%. Prepare solución semanalmente.

2. Nitroprusiato de sodio 0,5%. Pese 0,5g de la sal y dilúyalos en 100ml de agua desionizada. Guárdalas en botellas ámbar por 1 mes.

3. Citrato alcalino 20%. Pese 20g de citrato de sodio y 10g de NaOH, se diluyen en 100ml de agua desionizada.

4. Hipoclorito de sodio. Solución comercial, 5%. Reemplace cada dos meses.

5. Solución oxidante. Mezcle 100ml de citrato alcalino con 25ml de hipoclorito de sodio. Prepare esta solución diariamente.

6. Solución stock de NH_3. Disuelva 3,819g de NH_4Cl en agua a 1000ml, 1ml = 1,00mg N = 1,22mg NH_3.

Procedimiento:

- Preparación de la curva de calibración

1. Prepare una curva que cubra el rango de 0,1*u*g N/l. Diluir 1ml de la solución stock a 100ml de agua exenta de amonio, 1ml = 10*u*g N. (Solución madre).

2. De la solución madre de NH_3 tome alícuotas de 1, 2, 4, 6 y 8ml. Lleve cada una de las alícuotas a 100ml (aforados) con agua destilada.

- Tratamiento de la muestra y estándares

1. A 100ml de muestra y estándares agregue 1ml de solución de fenol, agite.

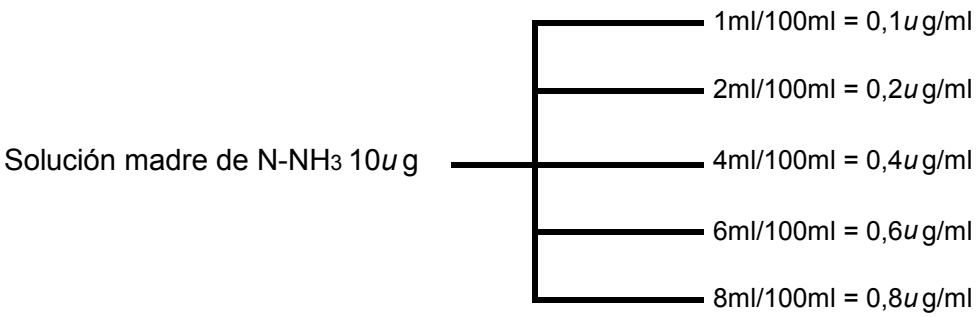
2. Luego agregue 1ml de solución de nitroprusiato de sodio. Agite.

3. Por último agregue 2,5ml de solución oxidante. Agite y deje desarrollar el color por una hora.

4. Lea a 640 nm hasta 24 horas después.

- Si luego del desarrollo del color las muestras presentan turbiedad, se deben filtrar a través de un filtro cualitativo.

- Si las muestras están ácidas se debe neutralizar antes de tratarlas.



3.2.4. Determinación del pH, Conductividad, Oxígeno Disuelto, Temperatura y Sólidos Suspendidos

El Combo tester HI 98130 tiene un electrodo de pH reemplazable con una juntura de tela extensible y un electrodo de grafito, el cual resiste contaminación por sales y otras sustancias que están en contacto con el electrodo. Este medidor tiene una sonda de acero inoxidable para más rápidas y precisas mediciones de temperatura. Presenta un rango en Conductividad desde 0.00 a 20.00 mS/cm y en Sólidos Suspendidos, desde 0.00 a 10.00 ppm. (Ver anexo Nº 1)

3.2.5 Determinación de tasa de producción de vermicompost y conteo de lombrices

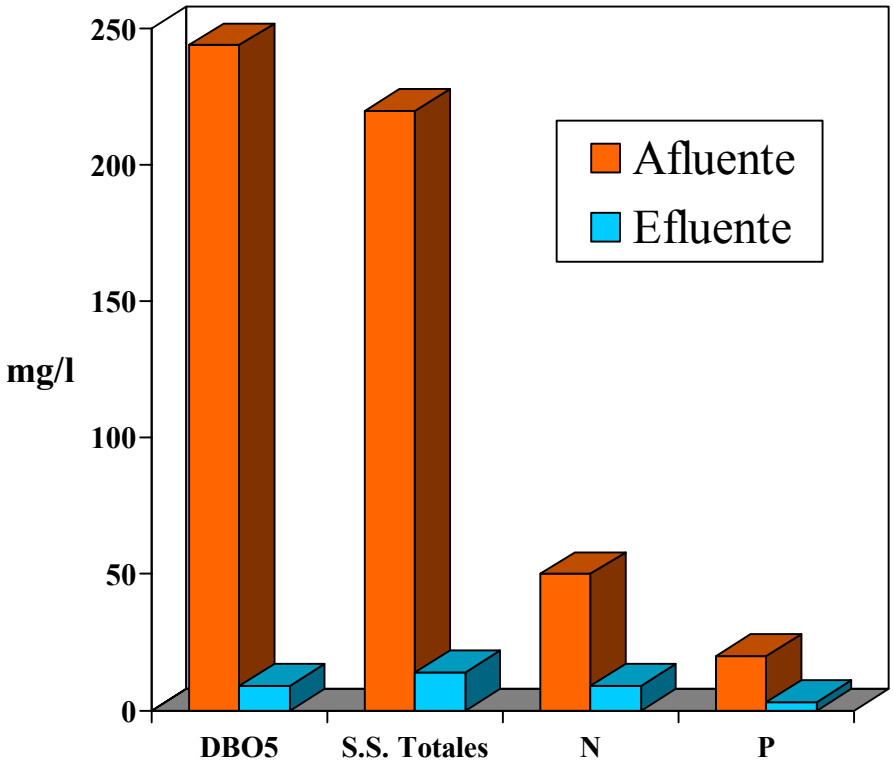
La producción de vemicompost, se calculó determinando el porcentaje de incremento entre la masa inicial y la final.

Para la determinación del número de lombrices al final de la experimentación, se realizó un conteo directo de individuos, separándolas en juveniles y adultas, para luego pesarlas.

IV
RESULTADOS Y DISCUSION

Se obtuvo, experimentalmente, la reducción de al menos un 80% de la materia orgánica del efluente en el biofiltro, cumpliendo con la Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descarga de Residuos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (D. S .Nº 90/2000), y el Requisito para la Calidad de Agua para regadío (NCh Nº 1.333).

Se ha demostrado, en experiencias anteriores (Soto y Tohá, 1998; Valencia, 2001), que este sistema; al aplicarle una tasa continua de 1 m^3/m^2/día de aguas servidas crudas, se obtienen reducciones del orden de 99% de DBO_5, 89% en nitrógeno y 70% en fósforo y reducciones superiores al 95% para sólidos suspendidos totales (SST) y 96% para sólidos suspendidos volátiles. Como se muestra en la Figura Nº 12 y tabla Nº 20 (Soto y Tohá, 1998).



Valores promedios de DBO_5, sólidos suspendidos totales, volátiles, N y P, antes y después del tratamiento.

Fuente: Soto y Tohá, 1998

Figura Nº 12. Eficiencia del biofiltro: valores máximos y mínimos de los parámetros de DBO_5, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, nitrógeno total y fósforo total.

Tabla Nº 20: **Porcentaje de Reducción del Sistema Propuesto**

Parámetros	Eficiencia (% de disminución)
Sólidos Suspendidos Totales	86 – 98
DBO	91 – 95
DQO	84 – 99
Coliformes	99

Fuente: DIA, Planta Río Blanco, 1999.

4.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES:

Uno de los primeros reactivos utilizados para simular nutrientes en el efluente, fue la Urea, con éste reactivo se esperaba obtener la concentración de nitrógeno amoniacal entre 12-50 (mg/l), (Metcalf y Eddy, 1996) , luego éste fue cambiado por Cloruro de Amonio, ya que este reactivo cumplía una mejor facilidad de análisis, obteniendo mejores resultados, debido a que la urea necesitaba un proceso de digestión (aplicación de solución digestora) para pasar a ser nitrógeno amoniacal, por lo tanto los resultados de nitrógeno amoniacal fueron menores a los esperados; en cambio el cloruro de amonio al ser soluble en agua se disociaba rápidamente en ion cloruro y ion amonio, sin necesitar el proceso de digestión.

La composición del efluente de agua residual urbana a la que se quería llegar es la señalada en la Tabla Nº 21, Composición del Agua Residual Urbana

Tabla N º 21: Composición del Agua Residual Urbana

Composición	Concentración (mg/l)
DQO	400*
Fósforo	3-5
Nitrógeno Amoniacal	12-50

Fuente: Metcalf y Eddy, 1996

*Se calculó en base a una DBO_5 de 250 (mg/l)

Para esto se utilizaron distintos reactivos químicos y polímeros con el fin de simular el agua residual urbana, debido a la imposibilidad de poder trabajar con agua residual real por la variación de sus compuestos y concentraciones, además por los problemas sanitarios que este implicaba en su manipulación.

4.2. ANÁLISIS QUÍMICOS DEL AGUA

4.2.1. Análisis de DQO

Tabla Nº 22: Resultado Análisis de DQO

	RESULTADOS DQO			
	DQO (mg/l)	**Entrada**	**Salida**	**% Remoción**
Etapa Estabilización (20%)	1º Medición	**738,00**	137,00	81,44
	2º Medición	595,32	114,00	80,85
	3º Medición	236,16	39,70	83,19
20%	4º Medición	196,80	39,30	80,03
	5º Medición	226,32	37,20	83,56
	6º Medición	236,16	36,90	84,38
	7º Medición	145,34	17,10	88,23
	8º Medición	144,54	15,20	89,48
	9º Medición	147,44	14,80	89,96
30%	10º Medición	145,45	13,00	91,06
	11º Medición	195,23	69,30	64,50
	12º Medición	208,32	45,20	78,30
	13º Medición	212,56	29,20	86,26
50%	14º Medición	209,30	15,20	92,74
	15º Medición	320,54	70,40	78,04
	16º Medición	291,75	48,30	83,44
	17º Medición	305,25	30,60	89,98
75%	18º Medición	314,63	25,40	91,93
	19º Medición	411,23	73,20	82,20
	20º Medición	392,21	42,30	89,21
	21º Medición	395,60	43,70	88,95
	22º Medición	408,40	30,20	92,61
100%	23º Medición	404,20	30,60	92,43
	Promedio			**85,34**
	Promedio al 100% de concentración			**89,08**
	Promedio (s/p.e)*			**85,74**

***s/p.e = sin periodo de estabilización**

El periodo de estabilización de 2 semanas, se realizó para lograr la adaptación de las lombrices al sistema, al cambio de alimentación y para lograr un adecuado tiempo de residencia hidráulico.

El incremento en la concentración de la materia orgánica y de los nutrientes, es paulatina de acuerdo a la eficiencia, sobre el 90% en una carga, que se logra en la remoción de estos.

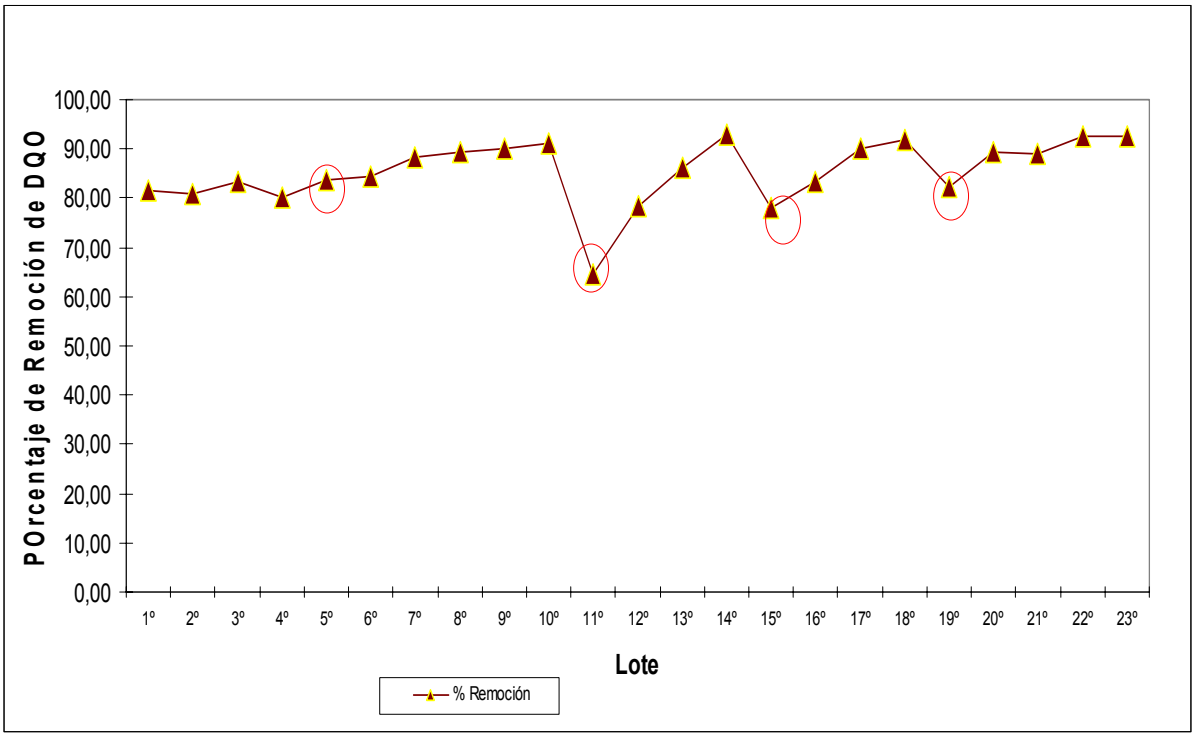


Figura N º13: Remoción de DQO

En la Figura Nº 13 "Remoción de DQO", los círculos encierran disminuciones bruscas en la eficiencia de remoción de DQO en el lombrifiltro, debido a que en esos días de análisis (11,15 y 19) se realizó el aumento de concentración de los nutrientes que aportaban la DQO (almidón, gelatina, aceite y sacarosa). La línea continua muestra el porcentaje de disminución de DQO, respecto a la concentración de entrada versus la salida. Los porcentajes de aumento de la concentración del efluente simulado a tratar fueron de 30 al 50; de 50 al 75; y de 75 al 100%. En la quinta medición, no se aprecia una disminución significativa de la eficiencia de la remoción de DQO debido, posiblemente, a que el aumento de la concentración fue menor, saltando del 20 al 30%.

Las altas concentraciones de DQO al comienzo de la investigación se deben, a que el estanque de suministro había sido utilizado antes sin ser limpiado, dejando restos de materia orgánica en las paredes, provocando una concentración mayor a la esperada.

En la séptima medición, previo a la toma de la muestra, se realizó la limpieza del estanque pulmón, por eso se ve una disminución considerable, que acercaba más a la esperada.

4.2.2. Nitrógeno Amoniacal

Tabla Nº 23: Resultados análisis nitrógeno amoniacal

	RESULTADOS N Amo			
	N Amo (mg/l)	**Entrada**	**Salida**	**% Remoción**
Etapa Estabilización (20%)	1º Medición	1,14	0,94	17,54
	2º Medición	3,87	1,54	60,21
20% (Urea)	3º Medición	0,46	0,08	82,61
	4º Medición	0,49	0,08	83,06
30% (Urea)	5º Medición	0,42	0,07	83,33
	6º Medición	0,24	0,05	81,01
	7º Medición	0,77	0,08	89,58
	8º Medición	0,38	0,04	88,68
	9º Medición	0,35	0,05	87,14
	10º Medición	0,41	0,04	89,76
50% (Cloruro de amonio)	11º Medición	22,20	5,80	73,87
	12º Medición	26,10	5,40	79,31
	13º Medición	24,40	3,80	84,43
	14º Medición	25,30	2,50	90,12
75% (Cloruro de amonio)	15º Medición	39,20	8,54	78,21
	16º Medición	38,23	6,23	83,70
	17º Medición	36,80	3,60	90,22
	18º Medición	37,75	3,80	89,93
100% (Cloruro de amonio)	19º Medición	52,65	13,2	74,93
	20º Medición	47,84	7,10	85,16
	21º Medición	54,37	8,20	84,92
	22º Medición	51,30	3,60	92,98
	23º Medición	46,52	4,20	90,97
	Promedio			**80,94**
	Promedio al 100% de concentración			**85,79**
	Promedio (s/p.e)*			**84,95**

***s/p.e = sin periodo de estabilización**

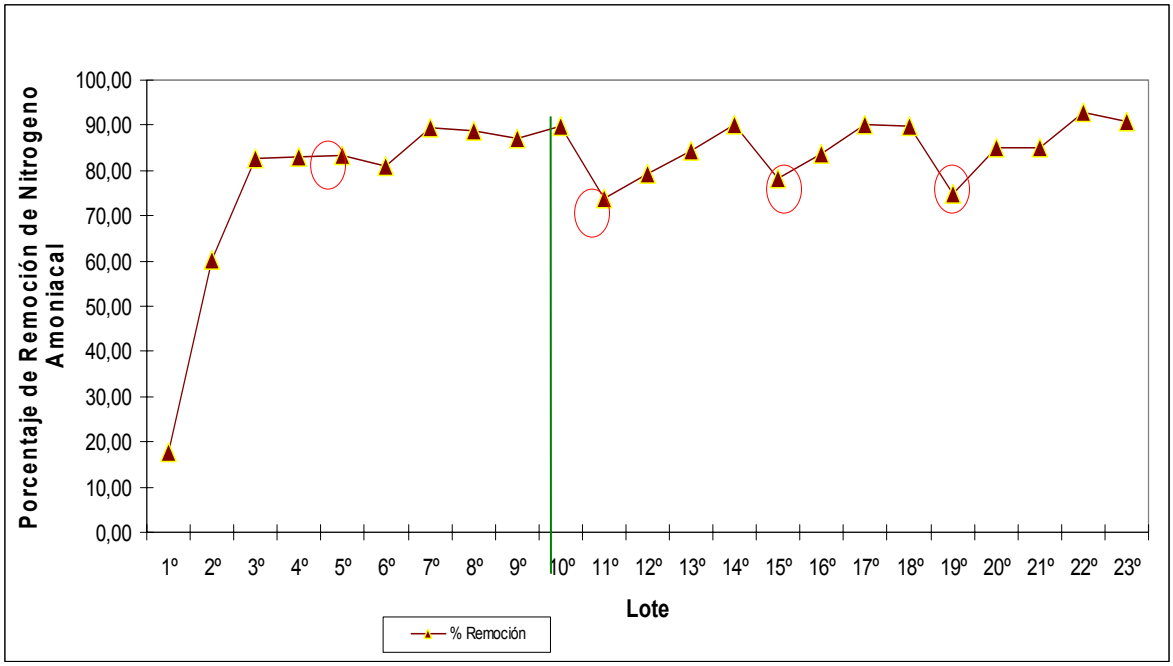


Figura Nº 14: Remoción de Nitrógeno Amoniacal

En la Figura Nº 14 “Remoción de Nitrógeno Amoniacal”, los círculos encierran disminuciones bruscas en la eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal en el lombrifiltro, debido a que en esos días de análisis (11,15 y 19) se realizó el aumento de concentración del reactivo (Cloruro de amonio). La línea continua muestra el porcentaje de disminución del nitrógeno amoniacal de entrada versus la salida. Los porcentajes de aumento de la concentración del efluente simulado a tratar fueron de 30 al 50; de 50 al 75; y de 75 al 100%. En la quinta medición, no se aprecia una disminución significativa de la eficiencia de la remoción de nitrógeno amoniacal debido, posiblemente, a que el aumento de la concentración fue menor, saltando del 20 al 30%.

En la medición N° 11, se efectuó el cambio de reactivo (urea → cloruro de amonio), indicado por la línea vertical punteada, por eso se aprecia un aumento considerable en la concentración de Nitrógeno amoniacal (Tabla N° 23), pero manteniéndose el porcentaje de remoción.

4.2.3. Fósforo Total

Tabla Nº 24: Resultados Análisis de Fósforo

	RESULTADOS Fósforo			
	Fósforo (mg/l)	**Entrada**	**Salida**	**% Remoción**
Etapa Estabilización (20%)	1º Medición	10,11	3,24	67,95
	2º Medición	4,31	0,90	79,12
	3º Medición	4,13	0,80	80,63
20%	4º Medición	2,30	0,35	84,78
	5º Medición	1,70	0,21	87,65
	6º Medición	1,62	0,19	88,27
	7º Medición	1,43	0,16	88,81
	8º Medición	1,94	0,20	89,69
	9º Medición	1,32	0,14	89,39
30%	10º Medición	1,63	0,17	89,57
	11º Medición	2,64	0,56	78,79
	12º Medición	2,28	0,53	76,75
	13º Medición	2,42	0,34	85,95
50%	14º Medición	2,54	0,23	90,94
	15º Medición	3,82	0,76	80,10
	16º Medición	3,63	0,46	87,33
	17º Medición	3,92	0,34	91,33
75%	18º Medición	3,68	0,32	91,30
	19º Medición	5,21	1,24	76,20
	20º Medición	4,83	0,85	82,40
	21º Medición	4,31	0,46	89,33
	22º Medición	5,52	0,34	93,84
100%	23º Medición	5,23	0,45	91,40
	Promedio			**85,28**
	Promedio al 100% de concentración			**86,63**
	Promedio (s/p.e)*			**86,40**

***s/p.e = sin periodo de estabilización**

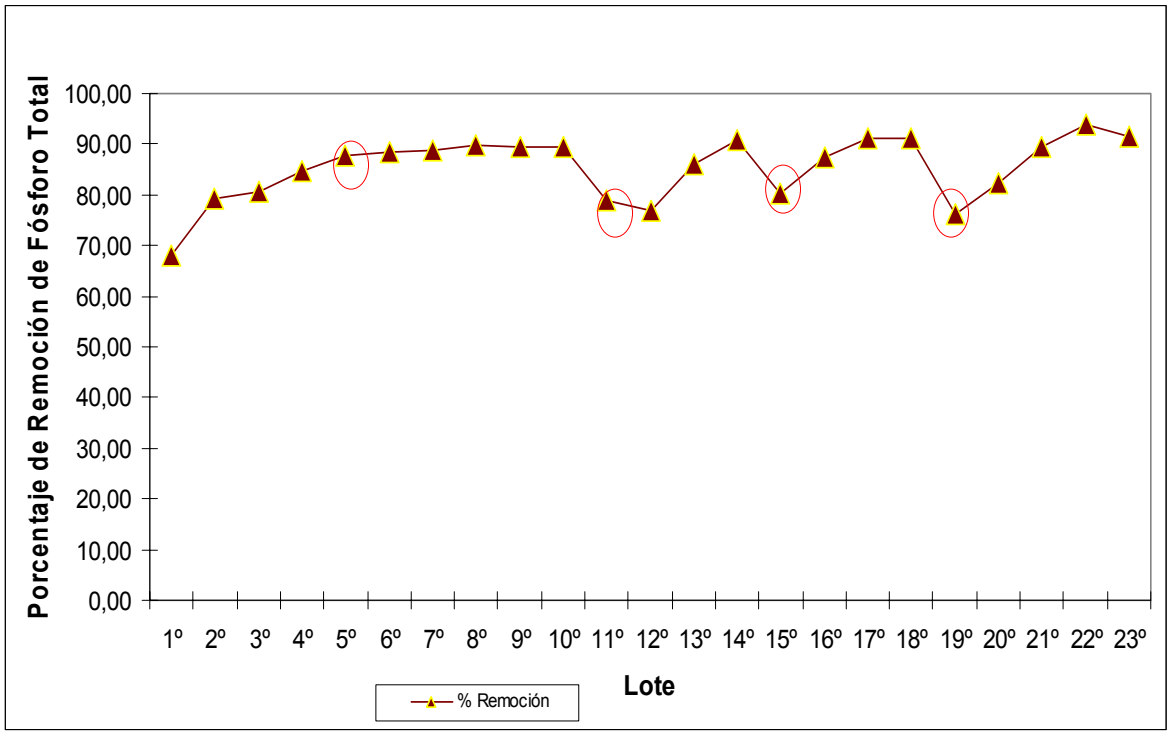


Figura Nº 15: Remoción de Fósforo total

En la Figura Nº 15 "Remoción de Fósforo Total", los círculos encierran disminuciones bruscas en la eficiencia de remoción de fósforo total en el lombrifiltro, debido a que en esos días de análisis (11,15 y 19) se realizó el aumento de concentración del reactivo (Fosfato de potasio). La línea continua muestra la disminución de fósforo durante el periodo de investigación. Los porcentajes de aumento de la concentración del efluente simulado a tratar fueron de 30 al 50; de 50 al 75; y de 75 al 100%. En la quinta medición, no se aprecia una disminución significativa de la eficiencia de la remoción de fósforo total debido, posiblemente, a que el aumento de la concentración fue menor, saltando del 20 al 30%.

Las altas concentraciones de fósforo total al comienzo de la investigación se deben, a que el estanque de suministro había sido utilizado antes sin ser limpiado, dejando restos, posiblemente, de detergentes en las paredes, provocando una concentración mayor a la esperada.

Con la cantidad de fosfato de potasio utilizado, se alcanzaría una concentración aproximada de 0,4 (mg/l), pero es posible que la sobredimensión de las concentraciones

experimentales, se deba a la naturaleza compleja del efluente sintético que pueda presentar alguna interferencia en el método utilizado para medir este parámetro, posiblemente por: un aporte extra de estos elementos a partir de otros nutrientes agregados o se puede deber a que algunos de los compuestos oxidantes que deben reaccionar con los elementos de interés, también pueden reaccionar con otros compuestos diferentes, presentes en la muestra (Smith, 1982)

4.3. ANÁLISIS FÍSICOS DEL AGUA:

4.3.1. pH.

Tabla Nº 25: Análisis pH

Día	pH	
	Entrada	Salida
1	7,75	6,39
2	7,76	6,88
3	7,04	6,97
4	6,98	6,85
5	6,94	6,96
6	6,83	6,76
7	6,90	6,88
8	6,53	6,47
9	6,38	6,36
10	6,49	6,33
11	6,50	6,47
12	5,74	5,94
13	6,04	6,00
14	5,97	5,98
15	6,13	6,14
16	6,56	6,22
17	6,34	6,19
18	6,27	6,14
19	6,46	6,31
20	6,44	6,19
21	6,46	6,23
22	6,59	6,34
23	6,64	6,26
24	6,70	6,25
25	6,42	6,33
26	6,64	6,54
27	6,61	6,37
28	6,23	6,21
29	6,53	6,55
30	6,57	6,43
Promedio	***6,58***	***6,40***
Máximo	***7,76***	***6,97***
Mínimo	***5,74***	***5,94***
Desviación estándar	***0,43***	***0,29***
Moda	***6,53***	***6,88***
Mediana	***6,53***	***6,34***

La variación en el pH, como muestra la Tabla Nº 25, respecto a la entrada y salida no es considerable, dando un promedio en la entrada de 6,58, con un valor máximo de 7,76 y un mínimo de 5,74; en la salida un promedio de 6,40 con un valor máximo de 6,97 y un mínimo de 5,94. Como se muestra en la Figura Nº 16.

Al ser las medidas de tendencia central (promedio, mediana y moda), similares entre la entrada y salida, se asume que el 66% de estos datos se encuentran en los rangos de [6,15; 7,01] y [6,61; 6,69] respectivamente.

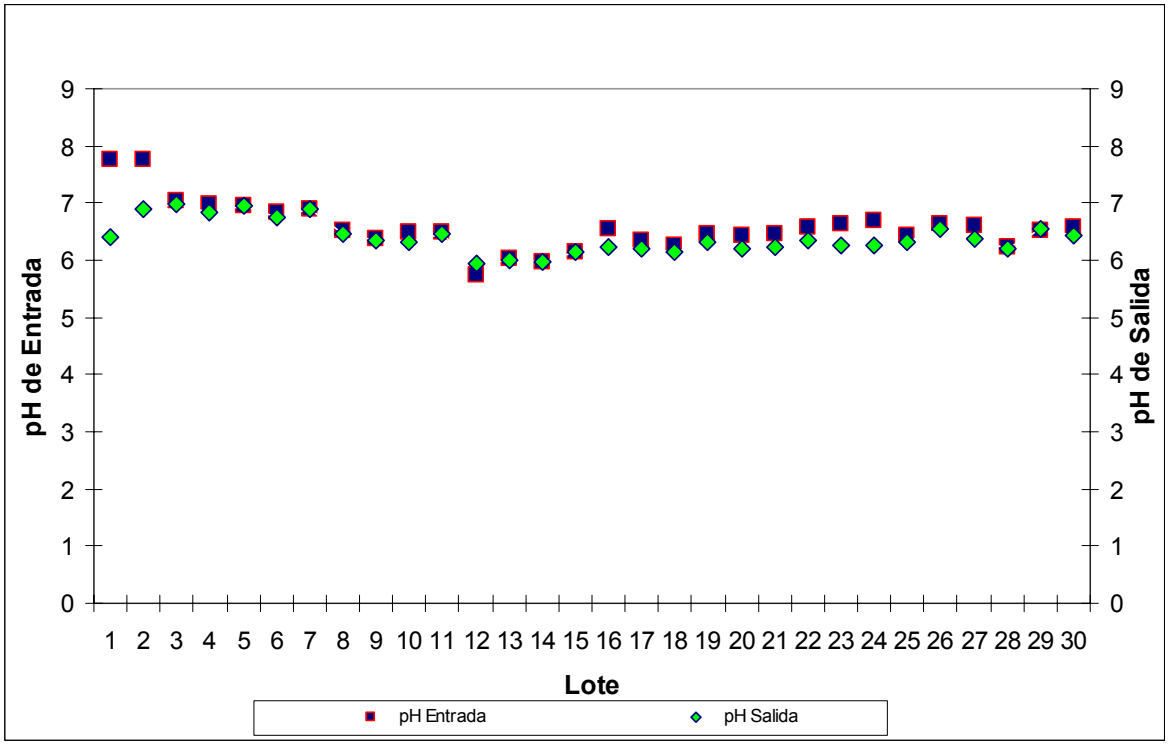


Figura Nº 16: Variación de pH

4.3.2. Conductividad

Tabla Nº 26: Análisis de conductividad

Día	Conductividad (ms)	
	Entrada	Salida
1	0,41	0,59
2	0,40	0,56
3	0,40	0,46
4	0,40	0,45
5	0,40	0,43
6	0,40	0,42
7	0,40	0,44
8	0,40	0,42
9	0,39	0,41
10	0,39	0,42
11	0,40	0,47
12	0,35	0,46
13	0,39	0,46
14	0,41	0,45
15	0,43	0,44
16	0,44	0,44
17	0,43	0,43
18	0,44	0,44
19	0,66	0,50
20	0,82	0,57
21	0,83	0,67
22	0,79	0,70
23	0,94	0,76
24	0,92	0,72
25	0,78	0,63
26	0,68	0,53
27	0,73	0,62
28	0,84	0,70
29	0,53	0,48
30	0,67	0,51
Promedio	***0,55***	***0,52***
Máximo	***0,94***	***0,76***
Mínimo	***0,35***	***0,41***
Desviación estándar	***0,19***	***0,11***
Moda	***0,40***	***0,44***
Mediana	***0,43***	***0,47***

La variación en la conductividad, como muestra la Tabla Nº 26, respecto a la entrada y salida no es considerable, dando un promedio en la entrada de 0,55, con un

valor máximo de 0,94 y un mínimo de 0,35; en la salida un promedio fue de 0,52 con un valor máximo de 0,76 y un mínimo de 0,41. Como se muestra en la figura Nº 17.

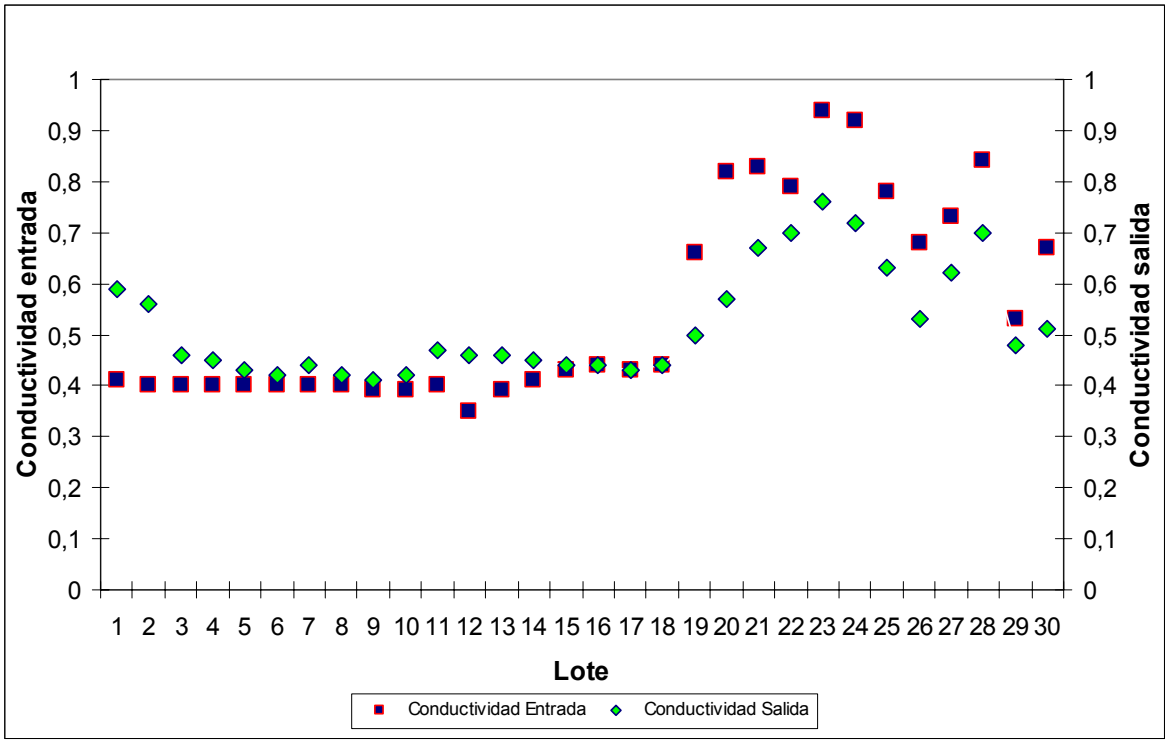


Figura Nº 17: Variación de conductividad escala

4.3.3. Sólidos Suspendidos

Tabla Nº 27: Análisis de Sólidos Suspendidos

Día	Sólidos suspendidos (ppm)	
	Entrada	Salida
1	0,20	0,30
2	0,20	0,29
3	0,21	0,24
4	0,20	0,22
5	0,20	0,21
6	0,19	0,20
7	0,20	0,22
8	0,20	0,21
9	0,19	0,21
10	0,19	0,21
11	0,19	0,24
12	0,18	0,23
13	0,19	0,23
14	0,20	0,22
15	0,29	0,22
16	0,21	0,22
17	0,22	0,21
18	0,22	0,21
19	0,33	0,24
20	0,40	0,28
21	0,41	0,34
22	0,39	0,35
23	0,47	0,37
24	0,46	0,36
25	0,45	0,33
26	0,48	0,36
27	0,44	0,29
28	0,40	0,31
29	0,45	0,35
30	0,47	0,33
Promedio	***0,29***	***0,27***
Máximo	***0,48***	***0,37***
Mínimo	***0,18***	***0,20***
Desviación estándar	***0,12***	***0,06***
Moda	***0,20***	***0,21***
Mediana	***0,22***	***0,24***

La variación en los sólidos suspendidos, como muestra la Tabla Nº 27, respecto a la entrada y salida no es considerable, dando un promedio en la entrada de 0,29, con un valor máximo de 0,48 y un mínimo de 0,18; en la salida un promedio de 0,27 con un valor

máximo de 0,37 y un mínimo de 0,20. Como se muestra en la figura Nº 18, además se ve que en la entrada el 50% de los valores está bajo 0,215 ppm, y el resto 50% sobre éste valor, en cambio en la salida el 50% de los valores de sólidos suspendidos se encuentran bajo 0,24 ppt y el resto 50% sobre éste valor.

Al ser las medidas de tendencia central (promedio, mediana y moda), entre la entrada y salida, similares se asume que el 66% de estos datos se encuentran en los rangos de [0,18; 0,41] y [0,21; 0,33] respectivamente.

No se consideró la acumulación de sólidos suspendidos finos en la superficie del agua, ya que estos son de tipo orgánico por lo que las lombrices los degradan sin dificultad.

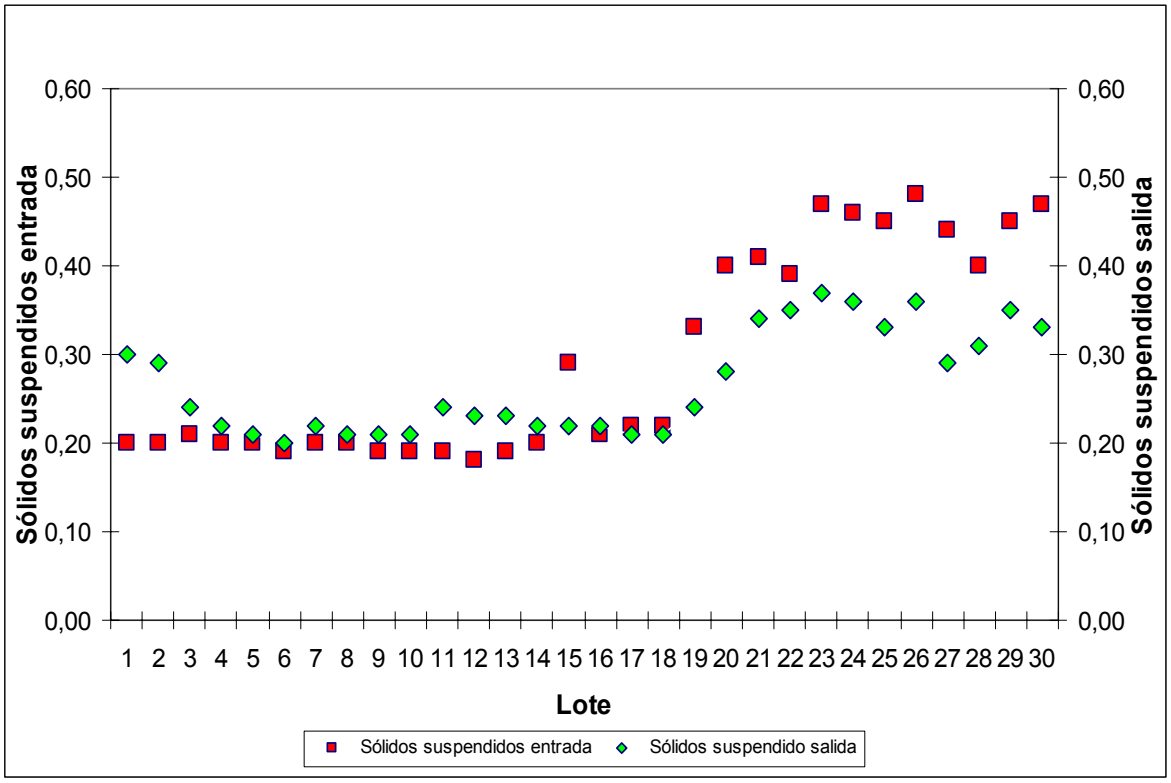


Figura Nº 18: Variación de Sólidos Suspendidos

4.3.4. Temperatura

Tabla Nº 28: Análisis de Temperatura

Día	Temperatura (ºC)	
	Entrada	Salida
1	22,90	24,72
2	22,30	25,90
3	20,60	24,30
4	23,10	24,80
5	21,20	20,30
6	22,90	21,40
7	21,30	20,80
8	20,30	19,70
9	25,50	23,40
10	21,20	21,70
11	21,20	23,80
12	26,50	25,30
13	22,70	25,20
14	24,40	29,10
15	23,80	29,00
16	20,20	20,40
17	25,50	24,80
18	21,10	22,80
19	21,50	20,90
20	21,90	21,90
21	21,60	22,30
22	21,90	22,10
23	21,00	23,50
24	23,60	25,10
25	21,40	21,90
26	22,50	22,20
27	24,20	22,60
28	23,20	24,20
29	21,70	20,50
30	23,10	22,10
Promedio	***22,48***	***23,22***
Máximo	***26,50***	***29,10***
Mínimo	***20,20***	***19,70***
Desviación estándar	***1,60***	***2,34***
Moda	***21,20***	***24,80***
Mediana	***22,10***	***22,70***

La variación en la temperatura, como muestra la tabla Nº 28, respecto a la entrada y salida no es considerable, dando un promedio en la entrada de 22,48, con un valor máximo de 26,5 y un mínimo de 20,2; en la salida un promedio de 23,22 con un valor

máximo de 29,1 y un mínimo de 19,7. Como se muestra en la figura Nº 19, además, se ve que el 50% de los valores de la entrada están bajo 22,1 ºC y el resto sobre éste valor, en cambio en la salida el 50% de los daros de temperatura están bajo 22,7 ºC y el resto sobre éste.

Al ser las medidas de tendencia central (promedio, mediana y moda), entre la entrada y salida similares, se asume que el 66% de estos datos se encuentran en los rangos de [20,88; 24,07] y [20,89; 25,56] respectivamente.

Según ESVAL, la temperatura media del agua residual urbana tiene un rango típico entre 10 a 20 °C, los resultados de la investigación son más alto, posiblemente por la exposición que tenía el estanque pulmón a la radiación solar, haciendo que la temperatura dentro de este aumentara.

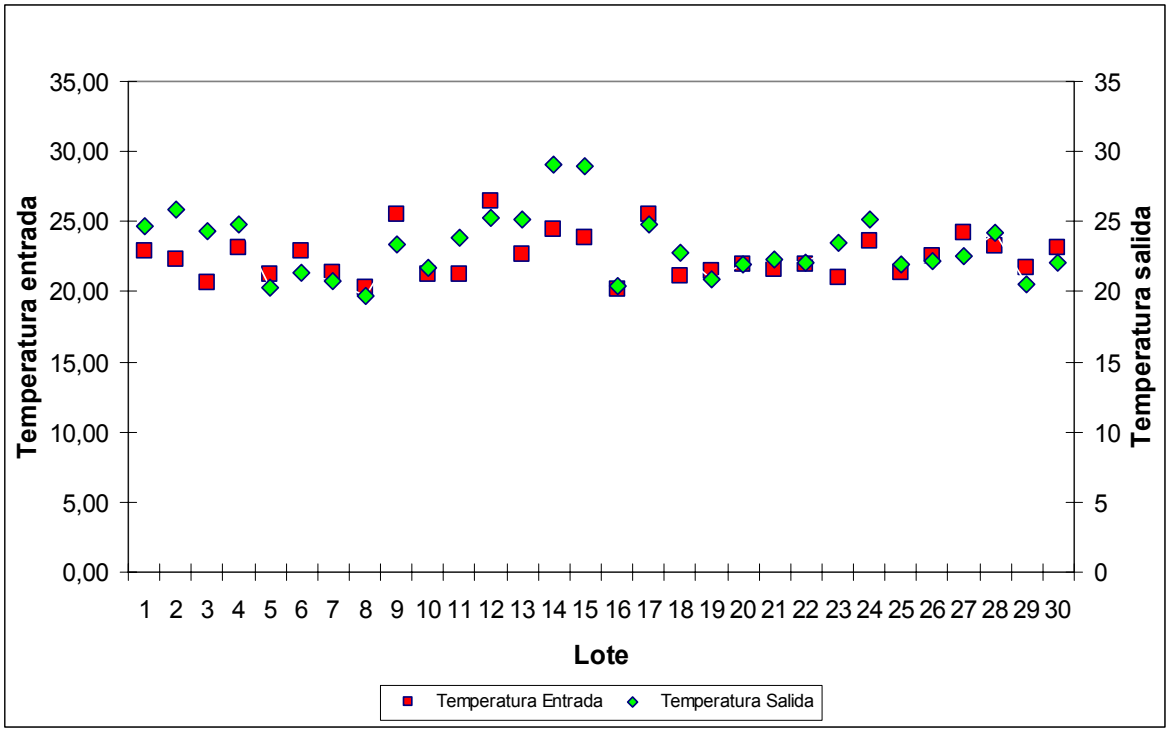


Figura Nº 19: Variación de Temperatura

4.3.5. Oxígeno Disuelto

Tabla Nº 29: Análisis de Oxígeno Disuelto

Día	Oxígeno disuelto (mg O2/l)	
	Entrada	Salida
1	11,20	10,20
2	12,15	11,70
3	11,75	4,60
4	14,75	7,90
5	7,40	7,00
6	7,60	14,50
7	6,55	7,30
8	11,75	8,30
9	9,55	5,20
10	10,00	12,95
11	7,25	7,50
12	5,60	3,70
13	4,80	3,10
14	6,75	3,40
15	7,20	3,20
16	5,60	4,30
17	8,45	3,95
18	5,15	4,30
19	6,30	3,60
20	8,25	5,10
21	4,70	3,30
22	5,45	3,60
23	7,40	4,15
24	8,30	3,60
25	9,85	4,65
26	10,10	5,30
27	8,45	5,20
28	6,50	7,40
29	8,20	5,25
30	10,45	4,20
Promedio	***8,25***	***5,95***
Máximo	***14,75***	***14,50***
Mínimo	***4,70***	***3,10***
Desviación estándar	***2,48***	***3,01***
Moda	***11,75***	***3,60***
Mediana	***7,90***	***4,88***

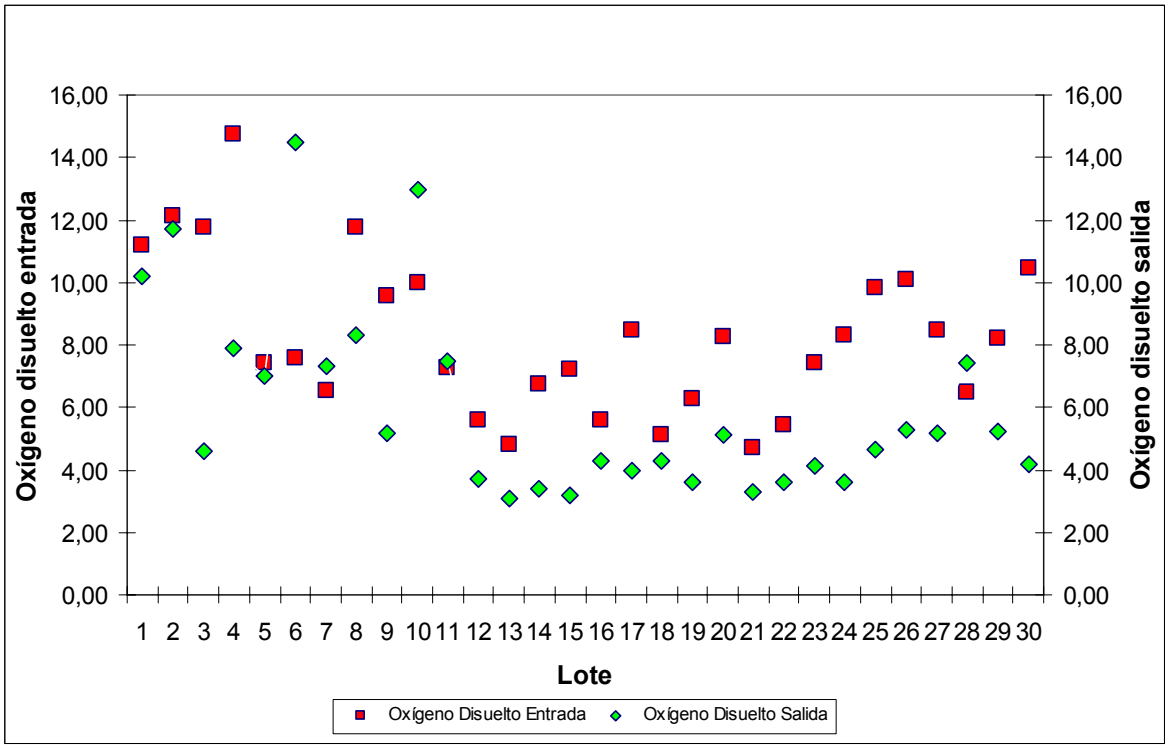


Figura Nº 20: Variación de Oxígeno Disuelto

El las mediciones de oxígeno disuelto se registran altas variaciones entra la entrada y la salida, como ejemplo se pueden revisar los datos de tendencia central, donde los valores son muy distintos unos con otros, debido posiblemente al poco movimiento que presenta el agua a tratar dentro del estanque pulmón y el receptor. Disminuyendo con esto las posibilidades de producción de las bacterias aeróbicas que afectan las concentraciones de agua simulada.

4.4. ANÁLISIS PRODUCCIÓN DE BIOMASA

Según los cálculos teóricos al finalizar la investigación se debería tener un número de lombrices entre las 3.000 y 20.400 (Como se muestra en la Tabla Nº 14). La siguiente tabla muestra la producción experimental de lombrices al final del periodo de investigación de 13 semanas, en donde se ve un aumento de, aproximadamente, un 700% en número de lombrices y su masa total en gramos.

Tabla Nº 30: Producción experimental de lombrices

Conteo	Nº lombrices			Masa Total (gr)
	Adultas	Juveniles	Total Lombrices	
Inicio	200	400	600	**184,49**
Final	385	3918	4303	**1353,11**

En el proceso de reproducción de lombrices, se obtuvo un número de 4.303 individuos, valor dentro del rango esperado (3.000 - 20.400), la producción pudo llegar al máximo del rango de haberse mantenido un proceso constante de tratamiento de agua. La falta de constancia radicó en que el paso del agua, en lugar de hacerse durante veinticuatro horas y siete días a la semana, se realizó en lapsos de tres horas diarias durante cuatro días por semana, debido a la disponibilidad de horarios, tanto de la escuela como de los investigadores.

Por otro lado la formación vermicompost, como subproducto es relativamente lenta, tomando un tiempo de aproximadamente seis meses en que la lombriz recicla en su tracto intestinal la materia orgánica y deyecciones. Lo que se obtuvo es un vermicompost, que se refiere a un humus de lombriz con una mayor concentración de nitrógeno y fósforo, con la misma calidad de un fertilizante orgánico biorregulador y corrector del suelo.

4.5. TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA

Teóricamente el tiempo de residencia hidráulica de este tipo de planta de tratamiento de aguas servidas, es entre 7 y 12 (min). (Ilustre Municipalidad de Los Andes. 1999).

La Tabla N° 31, muestra los valores experimentales de tiempo de residencia hidráulico, con un promedio de 4,2 (min) un máximo de 8 minutos y un mínimo de 2,9 (min), además muestra que el 50% de los datos se encuentran por debajo de los 4,1 (min) y el resto 50% esta por sobre este valor.

Al ser las medidas de tendencia central (promedio, mediana y moda) semejantes, se puede afirmar que el 66% de los datos se encuentra en el rango de [3,30; 5,11] minutos.

Al comienzo de la investigación, el tiempo de residencia hidráulico durante el periodo de estabilización, registró un valor de 8 (min), sobrepasando por mucho el promedio de 4,2 (min) al final de la investigación. Esto se debe a que fue la primera oportunidad en que se pasó agua por el lombrifiltro y éste necesitaba saturarse para funcionar como se requería. En cuanto al tiempo de residencia hidráulico mínimo de 2,9 (min), registrado el día 9, se debe al aumento del caudal de agua tratada.

Tabla Nº 31: Tiempo de Residencia Hidráulico experimental del lombrifiltro

Día	Tiempo de Residencia Hidráulica (min)
1	8,00
2	5,50
3	4,00
4	4,30
5	4,10
6	3,70
7	3,20
8	3,00
9	2,90
10	4,50
11	4,80
12	4,10
13	3,70
14	3,90
15	4,20
16	4,60
17	4,10
18	3,60
19	4,10
20	4,60
21	3,90
22	4,40
23	4,20
24	3,90
25	3,50
26	4,60
27	4,30
28	3,90
29	4,30
30	4,50
Promedio	4,20
Máximo	8,00
Mínimo	2,90
Desviación estándar	0,91
Moda	4,10
Mediana	4,10

4.6. CAUDAL

Tabla Nº 32: Caudal de Entrada Lombrifiltro (l/s)

Día	Caudal de Entrada (l/s)			Promedio día
	Principio	Medio	Final	
1	0,45	0,23	0,12	0,27
2	0,43	0,27	0,11	0,27
3	0,41	0,26	0,10	0,26
4	0,42	0,29	0,08	0,26
5	0,40	0,21	0,10	0,24
6	0,39	0,27	0,12	0,26
7	0,47	0,23	0,15	0,28
8	0,37	0,31	0,10	0,26
9	0,41	0,22	0,11	0,25
10	0,40	0,28	0,09	0,26
Promedio	0,42	0,26	0,11	0,26
Máximo	0,47	0,31	0,15	0,31
Mínimo	0,37	0,21	0,08	0,22
Desviación estándar	0,03	0,03	0,02	0,03
Moda	0,41	0,23	0,15	0,26
Mediana	0,41	0,27	0,11	0,26

El caudal de entrada del lombrifiltro, se midió al comienzo de la investigación durante el periodo de estabilización, para tener una referencia de cuanta agua pasaba durante un periodo de tiempo determinado, pudiendo manejar así el dato posteriormente. Luego la medición del caudal se realizó en tres tandas: la primera de ellas cuando el contenedor tenia aproximadamente 100 (l) de agua residual urbana simulada, con un caudal promedio de 0,42 (l/s); la segunda cuando éste tenía aproximadamente 50 (l) con un caudal promedio de 0,26 (l/s); y la tercera cuando ya estaba casi vacío, aproximadamente 10 (l) dando un caudal promedio de 0,11 (l/s). La técnica de medición realizada fue la siguiente, llenar un recipiente de 1 (l) de capacidad, tomando el tiempo de demora del llenado.

Tabla Nº 33: Caudal de Salida Lombrifiltro (l/s)

Día	Caudal de Salida l/s
1	0,20
2	0,22
3	0,21
4	0,17
5	0,19
6	0,20
7	0,21
8	0,23
9	0,19
10	0,20
Promedio	0,20
Máximo	0,23
Mínimo	0,17
Desviación estándar	0,02
Moda	0,20
Mediana	0,20

La medición del caudal de salida del lombrifiltro, se realizó minutos después (aproximadamente dos tiempos de residencia hidráulica) de que el agua tratada empezaba a caer en el recipiente de receptor de agua, dando un caudal promedio de 0,20 (l/s). Las medidas de tendencia central (promedio, mediana, moda) son las mismas, eso muestra que aproximadamente el 66% de los datos se encuentra en un rango de [0,18; 0,22] (l/s).

El caudal de salida se mantenía constante siempre y cuando el lecho del lombrifiltro estuviese saturado, por el contrario el caudal bajaba.

Por otro lado, al realizar la mantención del lombrifiltro (horqueteo), el caudal de salida disminuía, por el contrario el tiempo de residencia aumentaba, por aumentar el volumen del lecho.

4.7. RESUMEN DE PARAMETROS DE OPERACIÓN

Tabla Nº 34: Resumen de parámetros de operación

Parámetros	Medidas	Unidad
Flujo a tratar	0,42[a]	l/s
DQO	400	mg/l
N amoniacal	50	mg/l
Fósforo	5	mg/l
Carga superficial	0,017	kg/m^2*día
TRH	4,2	min
VCO	0,5[b]	mg/l*s

[a] = 0,00042 (m^3/s)
[b] calculado en base a un volumen de reactor de 0,336 (m^3) y una concentración de DQO al 100%

La tabla anterior muestra las concentraciones de DQO, Nitrógeno amoniacal y fósforo, trabajadas a un 100%. Los demás parámetros muestran el valor promedio obtenido teóricamente (carga superficial y velocidad de carga orgánica (VCO)) o experimentalmente (TRH y flujo).

V
CONCLUSIONES

En la reestructuración del sistema de tratamiento de aguas residuales ya existente, se analizaron las características de éste, para determinar la cantidad de agua residual simulada a tratar, en donde se determinó el área superficial (0,42 (m^2)) para luego identificar el volumen teórico a tratar. El volumen teórico máximo a tratar para lograr la mayor efectividad del lombrifiltro fue de 210 (l). En la practica se hizo pasar por el lecho del sistema 100 (l) de agua, cantidad suficiente para lograr la efectividad esperada, aproximadamente un 85% de remoción.

La formulación del efluente simulado, para lograr las concentraciones teóricas determinadas bibliográficamente, cumplió con lo propuesto por los investigadores, logrando las concentraciones estipuladas con antelación, para el posterior tratamiento en el lombrifiltro, con un rango de error aproximadamente del 7%.

En la puesta en marcha del lombrifiltro a escala piloto, después de automatizar en parte el sistema ya existente, hacer los cambios estructurales necesarios y determinar la estratificación del sustrato, se logró el funcionamiento más eficiente en el tratamiento de aguas, logrando valores de remoción de los parámetros químicos deseados (p.e. 85,34% de remoción de DQO)

El número de lombrices esperado era entre 3.000 - 20.400 ejemplares teóricamente. Experimentalmente el número de individuos fue de 4.303, cantidad que se encuentra dentro del rango esperado, demostrando que se logró un ambiente adecuado para la sobrevivencia de las lombrices, a pesar de la discontinuidad de la experimentación y de los factores externos como suministro de agua y el factor climático (temperatura).

Las características de estratificación del lombrifiltro fueron las adecuadas para la remoción de los parámetros químicos: el porcentaje de remoción de la DQO fue de un 85,34%; el porcentaje de remoción en el fósforo total fue de un 85,28%; y la remoción del nitrógeno amoniacal fue de 80,94% (los resultados consideran el periodo de estabilización), valores similares a los establecidos “En el Proyecto de Alcantarillado y

Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas en la Localidad de Rio Blanco, Los Andes" (Tabla N° 20). Además de mantener las características físicas del agua como el: pH, la temperatura y los sólidos suspendidos, dentro de lo establecido en el Decreto Supremo N° 90/2000.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARANGO LAWS, J. 2003. **Evaluación Ambiental del Sistema Tohá en la Remoción de *Salmonella* en Aguas Servidas Domésticas.** Tesis para optar al Grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Vicerrectoría de Asuntos Académicos, Departamento de Postgrado y Postítulo. 79 pág.

2. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATON (APHA). WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF). 1963. **Método Estándar para el examen de Aguas y Aguas de Desecho.** 11ª Edición. Editorial Iteramericana; S. A. Pág. 150, 183, 206.

3. BARAÑAO, P.; TAPIA, L. 2004. **Tratamiento de las aguas servidas: Situación en Chile**. Ciencia y Trabajo. 6 de Julio-septiembre; (13): 111-117

4. BOLIVAR, N. 2000. **Tratamiento de Aguas Blancas y Aguas Residuales.** Universidad de Oriente Escuela de Ciencias de la Tierra. Pág. 7-8 http://www.udo.edu.ve/ (Consulta en línea 19 de Mayo de 2005).

5. BOLLO, T, E. 1999. **Lombricultura una alternativa de reciclaje.** 1ª Edición. Quito, Ecuador. Pág. 13- 25. http://www.lombricultura.net (Consulta en línea 22 de Marzo de 2006)

6. CHILE SUSTENTABLE, 2005. **Disponibilidad y uso sustentable del agua en Chile.** http:// www.chilesustentable.cl. (Consulta en línea 11 de Abril de 2005).

7. Castro y Olivares. 2003. **Evaluación de Alternativas de tratamientos de aguas Residuales para Pequeñas Comunidades.** Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Pag. 1-7;10-13; 28-59

8. CONTRERAS, S.; SABAT, P. 2001. **Soluciones Sanitarias Ecológicas.** http://www.solsan.cl/solsan/index.html (Consulta en línea 15 de Junio de 2005)

9. CORBITT, R. 2003. **Manual de Referencia de la Ingeniería Ambiental**.1ª Edición. Madrid, España. Editorial McGraw- Hill. Pág. 5.14- 5.15; 7.3; 7.50

10. CRITES Y TCHOBANOGLOUS. 2000. **Sistemas de Manejo de Aguas Residuales Para Núcleos Pequeños y Descentralizados.** Colombia. Editorial McGraw-Hill. Tomo 1. Pag, 2-7; 42-46; 72-73; 313-317; 527-530

11. DGA. 1998. **Crisis y Sustentabilidad en la Gestión de Agua en Chile.**

12. ECOPORTAL. 2005. **Glosario Ambiental.** Vertidos Industriales. www.ecoportal.net/content/view/full/169/offset/23 (Consulta en línea 20 de Junio de 2005).

13. ESVAL. 2005. **Caracterización orgánica de las Aguas Servidas Domésticas.** Informe Técnico. http://www.esval.cl/Contacto.html (Consulta en línea 04 de Mayo de 2005).

14. FUNDACIÓN PARA LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE. 2005. **Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas sin Generación de Lodos, Base Antártica Eduardo Frei Montalva, XII Región**. Evaluación Preliminar de Impacto Ambiental. www.e-seia.cl (Consulta en línea 20 de junio de 2005).

15. GLYNN, H. J.; Y HEINKE, G. W. 1999. **Ingeniería Ambiental**. 2ª Edición. Madrid, España. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana; S.A. Pág. 347,389-390,457.

16. ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE LOS ANDES. 1999. **Proyecto de Alcantarillado y Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas mediante Biofiltro Dinámico Aeróbico, Plan de Mejoramiento de Barrios; Localidad de "Río Blanco", Quinta Región**. Declaración de Impacto Ambiental. 75 Pág.

17. ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE LOS ANDES. 1999. **Proyecto de Alcantarillado y Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas mediante Biofiltro Dinámico Aeróbico, Plan de Mejoramiento de Barrios; Localidad de "El Sauce", Quinta Región**. Declaración de Impacto Ambiental. 65 Pág.

18. ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE RINCONADA DE LOS ANDES. 2001. **Memoria de cálculo proyecto "Planta de Tratamiento de Aguas Servidas**

en población Mina Caracoles", Comuna de Rinconada de Los Andes, Quinta Región. 16 Pág.

19. INSTITUTO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL, 1978. **Norma de Calidad de Agua (NCh Nº 1333): Requisitos de Calidad de Aguas para Diferentes Usos**,1978. http://www.conama.cl/coaim/articles-15803.html. (Consulta en línea 19 de Mayo de 2005).

20. LLADSER, M.; CASTRO, F. 2005. **Deterioro de la calidad del agua para su utilización y menoscabo, y conflictos relacionados con la gestión y el aprovechamiento del agua.** Induambiental. http://www.induambiental.cl/1615/propertyyalue-37258.html. (Consulta en línea 31 de Mayo de 2005).

21. METCALF Y EDDY. 1996. **Ingeniería de Aguas Residuales**. 3ª Edición. México. Editorial McGraw -Hill. Volumen I. Pág. 17- 340; Volumen II. Pág.603-750; 1153- 1404

22. MINISTERIO DE AGRICULTURA. GOBIERNO DE CHILE. 2002. **Eficiente y sencillo sistema, El Lombrifiltro.** Nuestra Tierra (Nº 220) Pág. 24-25.

23. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. GOBIERNO DE CHILE. 1998. **Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado.**

24. SANDERS, W.T.M, 2001. **Anerobic hydrolysis during digestión of complex substrates, PhD thesis Wageningen University.**

25. Smith, J.L. 1982. **Plant constituents interfering with the lowry method of protein determination**. *Proc. Okla. Acad. Sci*. 62. 80-83.

26. UNIVERSIDAD DE CHILE. (1994). **BIOFILTROS, Tratamiento de Aguas servidas y Residuos Industriales Líquidos.** http://www.biofiltros.cl. (Consulta en línea 11 de Abril de 2005).

27. UNIVERSIDAD DE CHILE INSTITUTO DE ASUNTOS PÚBLICOS, DE POLÍTICAS PÚBLICAS. 2002. **Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile. "Aguas Continentales".** Capítulo 2. Pág. 69-101.

28. VIESSMAN, W. JR. AND HAMMER, M.J. 1993. **Water Supply and Pollution Control.** 5ª Edición. New York. Editorial Harper Collins.

ANEXOS

Anexo Nº 1: pHmetro

Anexo Nº 2: Estructura del Lombrifiltro, al comienzo de investigación

(a) Capas del Lombrifiltro

(b)Filtro con estanque pulmón

Anexo Nº 3: Sistema de Regadío existente en el Lombrifiltro

(a) Sistema de riego, tipo caída ducha

(b) Sistema de riego modificado

Anexo Nº 4: Sistema de ventilación

(a) Sistema de ventilación protegido con malla rachell

Anexo Nº 5: Sistema de recepción de agua tratada

Anexo Nº 6: Conteo de lombrices

(a) Conteo directo de lombrices al final de investigación

(b) Separación de lombrices adultas y juveniles