



Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales

Oscar Delgadillo • Alan Camacho • Luis F. Pérez • Mauricio Andrade



Serie Técnica



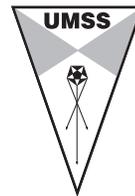
Blanca

Blanca

Serie técnica

Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales

Oscar Delgadillo
Alan Camacho
Luis Fernando Pérez
Mauricio Andrade



La publicación de este documento fue realizada con el apoyo financiero del Proyecto GOV-AGUA, Programa ALFA de la Unión Europea.

© Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA)

Universidad Mayor de San Simón
Av. Petrolera Km. 4.5 (Facultad de Agronomía)
Teléfono: + 591 (4) 4 76 23 82
Cochabamba, Bolivia.

Este documento fue elaborado en el marco del Proyecto HUMEDAL: “Zonas húmedas construidas para la depuración de aguas residuales”. Este proyecto de investigación – acción es ejecutado por el Centro AGUA de la UMSS (Bolivia) y el Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología de la Universidad de Barcelona (España) y financiado por la Generalitat de Cataluña a través de la Agencia Catalana de Cooperación al Desarrollo.

Edición: Nelson Antequera Durán

Depósito Legal N°: 2-1-154-10

ISBN: 978-99954-766-2-5

Cochabamba – Bolivia
2010

Contenido

Presentación.....	1
Introducción	3
1. Los humedales artificiales	7
Clasificación de los humedales artificiales	8
Humedales artificiales de flujo superficial	9
Humedales de flujo subsuperficial	9
Partes de los humedales de flujo subsuperficial	11
Mecanismos de remoción de contaminantes	14
Funciones de las macrófitas en los mecanismos de remoción.....	18
Ventajas y desventajas de los humedales artificiales	19
2. La totora planta fitodepuradora	21
Características generales de la totora	21
Características morfológicas.....	22
Manejo de la totora en los humedales.....	25
Prueba de implantación de totora en grava	27
3. Diseño y construcción de humedales artificiales	31
Diseño de humedales.....	31
Construcción de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical y horizontal.....	39
4. Monitoreo y muestreo de humedales artificiales.....	45
Planificación y ubicación de los puntos de muestreo.....	45
Metodología de recolección de muestras	48
Conservación y almacenamiento de muestras.....	51
5. Parámetros físicos para la caracterización de aguas residuales	53
Temperatura	53
Olor	53
Turbidez.....	54
Color	55
Conductividad eléctrica.....	56
Sólidos totales	56
6. Parámetros microbiológicos para la caracterización de aguas residuales	59
Las bacterias.....	61
Los virus de aguas residuales	66
Parásitos en aguas residuales.....	69

7. Parámetros químicos para la caracterización de aguas residuales.....	73
pH.....	73
Compuestos inorgánicos	74
Compuestos orgánicos	83
Bibliografía	88
Índice de figuras	94
Índice de cuadros	96
Índice de Ecuaciones	98
Glosario de términos	99

Presentación

Este libro es el resultado de la experiencia de un proyecto de investigación-acción denominado “Zonas húmedas construidas para la depuración de aguas residuales” (Proyecto HUMEDAL). El proceso de investigación interactivo conjugó durante los últimos tres años las capacidades y experiencias de un equipo de docentes investigadores de la Universidad de Barcelona (UB): Miquel Salgot, Josefina Tapias, Montserrat Folch y Antonina Torrens y un equipo de docentes investigadores del Centro AGUA de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS): Alfredo Durán, Iván del Callejo, Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luís Pérez, Mauricio Andrade y Ronald Argote.

La investigación se inició con la construcción de un humedal en la planta de tratamiento de aguas residuales del Municipio de Punata. Continuó con la construcción de otros dos humedales, uno en la comunidad de Thaqo (Punata) y otro en predios de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias, Forestales y Veterinarias (FCAPFyV) de la UMSS. Simultáneamente, se iniciaron trabajos de investigación sobre aspectos hidráulicos, fitotécnicos y ambientales, a través de la ejecución de tesis de grado. Tales actividades se complementaron con discusiones y capacitación a organizaciones y agricultores locales, quienes en algún momento deberán hacerse cargo de la gestión de estos sistemas.

Intercambios de docentes e investigadores de España a Bolivia y viceversa, permitieron al equipo del Centro AGUA, generar los conocimientos, experiencias y habilidades para implementar los procesos de diseño y construcción de los humedales. Todas las experiencias y capacidades acumuladas se han orientado también hacia la capacitación profesional, mediante la realización de tres cursos nacionales que han contado con profesionales de distintos sectores y de diversas regiones de Bolivia, y estudiantes extranjeros.

Toda esta experiencia está en fase de difusión y, de hecho, se percibe un creciente interés en los municipios, organizaciones de riego y pobladores en general para desarrollar las capacidades necesarias para la implementación de sistemas de humedales en sus respectivos ámbitos locales.

Esperamos que este libro constituya un aporte al conocimiento y al desarrollo de capacidades locales orientadas a enfrentar con mayores fortalezas el reto del tratamiento y re-uso de aguas residuales para lograr una mayor calidad ambiental y al mismo tiempo mejorar la disponibilidad de agua para usos agropecuarios.

También queremos expresar nuestra gratitud con el Ing. Marcelo Ledezma, del Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental de la Facultad de Ciencias y Tecnología (UMSS), por su atenta lectura de este texto y sus acertadas observaciones.

Finalmente, esperamos también que el esfuerzo colectivo entre docentes-investigadores de las Universidades de Barcelona y Mayor de San Simón y las entidades públicas y organizaciones sociales involucradas resulten, en última instancia, en alternativas concretas para los pobladores de las zonas a las cuales son vertidas las aguas residuales, aportando así desde la investigación académica a una mejor gestión de los recursos hídricos.

Cochabamba, febrero de 2010

Alfredo Durán Núñez del Prado
Coordinador Centro AGUA

Introducción

Existe una gran presión sobre los recursos hídricos a nivel mundial. Según la UNESCO (2003) el 69% del agua dulce disponible en el planeta se destina a la agricultura, representa el 23% a la industria y el 8% al consumo doméstico. Diversos aspectos como la mala distribución temporal y espacial o la degradación determinan la actual situación que se resume en un gran desequilibrio entre la oferta existente y la creciente demanda de agua.

En países en desarrollo como el nuestro, enfrentaremos una mayor competencia por el acceso al agua en las próximas décadas, debido al crecimiento demográfico, nuevos hábitos de vida y el desarrollo urbano e industrial sin una adecuada planificación. Es decir que se prevé un aumento en la demanda hacia las limitadas fuentes de agua. Así, la búsqueda de fuentes alternativas de agua, sobre todo para la agricultura, sector que demanda un mayor porcentaje, resulta de gran importancia.

Por otra parte, la disposición final de las aguas residuales producidas por las diferentes actividades humanas (principalmente usos domésticos e industriales) representa un problema cuya magnitud está en constante incremento y que se ve agravado cuando se trata de grandes urbes. Encarar este problema plantea un dilema crucial, ya que por un lado, el agua residual se constituye en una fuente alternativa importante para el riego de los cultivos, pero por otro lado, su uso para este fin, sin un adecuado tratamiento, puede constituirse a su vez en un problema mayor, por todos los riesgos que esto supone. En efecto, se han registrado a nivel mundial, muchos casos de brotes de enfermedades, casos de intoxicaciones masivas y se ha propiciado la degradación de diversos cuerpos de agua.

Según la UNESCO (2003) el uso que se hace del agua va en aumento en relación con la cantidad disponible. Los seis mil millones de habitantes del planeta ya se han adueñado del 54% del agua dulce disponible en ríos, lagos y acuíferos subterráneos. En el 2025, el hombre consumirá el 70% del agua disponible. Esta estimación se ha realizado considerando únicamente el crecimiento demográfico. Sin embargo, si el consumo de recursos hídricos per cápita sigue creciendo al ritmo actual, dentro de 25 años el hombre podría llegar a utilizar más del 90% del agua dulce disponible, dejando sólo un 10% para el resto de especies que pueblan el planeta.

En Bolivia el sector agrícola utiliza aún más agua (85%), la industria todavía es incipiente (5%) y el agua potable alcanza al 10%. Por otro lado, sólo un 40% del agua residual producida es tratada, a veces de forma insuficiente y el 60% restante no recibe ningún tipo de tratamiento (La Razón, 2009). En ambos casos, se vierten a cuerpos naturales o se utilizan indiscriminadamente para el riego, violando los parámetros de referencia estipulados en las normativas ambientales locales (Delgadillo *et al.*, 2008). En el cuadro 1 se muestran algunas características del destino de las aguas residuales producidas en las ciudades capitales del país.

Cuadro 1. Características del uso de aguas residuales producidas en las principales ciudades del país.

Ciudad	Características
Cochabamba	Uso directo de los efluentes de la planta de tratamiento y uso indirecto de las aguas contaminadas del río Rocha.
La Paz	Uso indirecto a través de la descarga del río Choqueyapu donde las aguas domésticas y la descarga industria sin pretratamiento.
El Alto	Uso indirecto a través del río Seco donde las aguas residuales donde las aguas residuales de la planta de tratamiento de Puchuckollo es descargado.
Santa Cruz	No hay reuso. Es una zona con alta pluviosidad y donde el riego no es practicado.
Oruro	No hay reuso. Los efluentes de la planta de tratamiento son descargadas en un área salina que no es adecuada para la agricultura.
Pando	Aún no se encuentra en funcionamiento. Su reuso es poco probable debido a que es una zona con alta pluviosidad y donde el riego no es practicado.
Beni	No hay reuso. Es una zona con alta pluviosidad y donde el riego no es practicado.
Tarija	Sin datos
Sucre	Uso indirecto a través del río donde vierte sus aguas la planta de tratamiento de aguas residuales.
Potosi	Sin datos

Fuente: Elaborado en base a Durán *et al* (2002) y La Razón (2009)

Se aprecia claramente que la escasez de agua en la zona occidental obliga en la mayor parte de los casos a utilizar las aguas residuales en riego. Esto lleva a situaciones que incrementan la complejidad del problema (contaminación del agua, competencia por el recurso, conflictos, acceso inequitativo, etcétera).

Frente a este panorama, surge la necesidad perentoria de buscar nuevas alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales que sean de bajo costo y de requerimientos sencillos de operación y mantenimiento. Es decir, que sean acordes a nuestra realidad y sobre todo para los sectores periurbanos y rurales, donde se concentran la mayoría de los puntos de descarga de aguas residuales y en los cuales la gestión sostenible de estas aguas se ha convertido en una demanda cada vez más urgente y que requiere una pronta respuesta tanto de los gobiernos municipales y prefecturas (Delgadillo *et al.*, 2008). Además, las características de estos sectores junto a la escasez de agua para riego, determinan que el reuso de aguas residuales para riego se convierta en una alternativa de actual y creciente importancia.

En el Cuadro 2 se ilustra claramente la enorme cantidad de agua residual que se generan en las principales urbes de Bolivia. De allí se infiere que las aguas residuales constituyen una fuente alternativa de agua de menor calidad pero de considerable cantidad y sobre todo, de constante producción a lo largo del año.

Cuadro 2. Estimaciones de los volúmenes de aguas residuales producidos en Bolivia.

Ciudad	Porcentaje de crecimiento	Población Urbana		Descarga de agua residual (l/s)		Volumen (10E6 m ³)	
		2001	2020	2001	2020	2001	2020
Cochabamba	4,19	855.277	1.865.527	712,70	1.554,60	22,50	49,00
Sucre	4,18	217.019	472.499	180,80	393,70	5,70	12,40
La Paz	2,82	1.549.759	2.628.685	1.291,50	2.190,60	40,70	69,10
Oruro	0,72	237.286	271.939	197,70	226,60	6,20	7,10
Potosí	0,99	237.576	286.478	198,00	238,70	6,20	7,50
Tarija	4,76	247.690	599.270	206,40	499,40	6,50	15,70
Santa Cruz	4,88	1.543.429	3.816.344	1.286,20	3.180,30	40,60	100,30
Beni	3,13	244.207	438.605	203,50	365,50	6,40	11,50
Pando	8,01	20.987	90.733	17,50	75,60	0,60	2,40
Bolivia		5.153.230	10.470.080	4.294,40	8.725,10	135,40	275,20

Fuente: Durán *et al.*, 2002

La forma inadecuada cómo se está gestionando y utilizando una gran parte del agua residual hace que esta fuente de agua para riego también se constituya en fuente potencial de varios problemas (salud, contaminación de suelos, aguas subterráneas, eutrofización de cuerpos de agua, etcétera).

A pesar de que la gestión de aguas residuales requiere de urgente atención de las autoridades competentes, no es un tema que se atienda de forma prioritaria. Generalmente es abordado ante una fuerte presión o demanda, cuando existen molestias muy grandes de las personas afectadas.

Como se ve, la problemática en torno al agua residual es sumamente compleja y se la puede abordar desde diferentes ángulos y con distintos enfoques. En ese sentido, la orientación del libro es considerar el agua residual como una fuente potencial para reusarla en el riego de algunos cultivos, especialmente en las zonas áridas y semiáridas de Bolivia. La ausencia de tratamientos adecuados a nuestro medio constituye la principal condicionante para el reuso.

Por tanto, el propósito de este trabajo es describir uno de los llamados sistemas blandos (tecnologías naturales de depuración) para el tratamiento de aguas residuales. Estos métodos suelen ser menos costosos y sofisticados en cuanto a operación y mantenimiento que los convencionales. Aunque dichos procesos requieren mayores extensiones de terreno en comparación con los de tipo intensivo, suelen ser igualmente eficaces en la eliminación de materia orgánica e incluso más efectivos en la remoción de elementos patógenos y nutrientes. Por otra parte, el consumo energético suele ser mínimo y su costo de mantenimiento muy bajo, requiriendo también personal menos especializado.

El contenido de este libro está dirigido fundamentalmente al personal técnico de municipios e instituciones que trabajan en medios rurales y periurbanos de Bolivia, donde las oportunidades de enfrentarse a problemas relacionados con la disposición de aguas residuales aumentan día a día y donde el acceso a la información es muy limitado. Así, este libro pretende que dicho personal pueda realizar sus primeras apreciaciones sobre el tema y también considerar seriamente afrontar el problema con una tecnología blanda de fácil diseño y cuya implementación es muy factible por su simplicidad.

El libro abarca cuatro aspectos: una descripción de la tecnología de los humedales, criterios de diseño hidráulico y constructivo de los humedales que ayudarán a dimensionar los mismos así como a considerar varios aspectos críticos para su construcción, elementos para muestrear aguas residuales (muy útiles a la hora de monitorear el funcionamiento de esta tecnología o cualquier otra) y aspectos conceptuales y técnicos para caracterizar las aguas residuales en términos físicos, químicos y microbiológicos.

La mayor parte de los criterios expuestos han surgido de la revisión bibliográfica y de la reflexión sobre las experiencias del proyecto HUMEDAL ejecutado por el Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua de la Universidad Mayor de San Simón y financiado por la Agencia Catalana de Cooperación para el Desarrollo.

Dicho proyecto ha diseñado, construido y realizado el monitoreo inicial de tres humedales en el municipio de Punata, en el departamento de Cochabamba. Cabe destacar que si bien hubo anteriores experiencias de humedales en Bolivia, esta es la primera en la que los humedales se han implementado para núcleos urbanos de más de doscientas personas. Así, el libro pretende constituir un referente básico sobre los aspectos más relevantes para permitir la difusión de esta tecnología.

Los humedales artificiales

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente.

El tratamiento de aguas residuales para depuración se lo realiza mediante sistemas que tienen tres partes principales: recogida, tratamiento y evacuación al lugar de restitución (Fernández *et al.*, 2004).

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

- Aguas domésticas y urbanas.
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros.
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.
- Tratamiento de fangos de depuradoras convencionales, mediante deposición superficial en humedales de flujo subsuperficial donde se deshidratan y mineralizan (García *et al.*, 2004).

Cuando el agua llega a una estación depuradora, pasa por una serie de tratamientos que extraen los contaminantes del agua y reducen su peligro para la salud pública. El número y tipo de tratamientos dependen de las características del agua contaminada y de su destino final.

Estos sistemas purifican el agua mediante remoción del material orgánico (DBO), oxidando el amonio, reduciendo los nitratos y removiendo fósforo. Los mecanismos son complejos e involucran oxidación bacteriana, filtración, sedimentación y precipitación química (Cooper *et al.*, 1996).

Los humedales eliminan contaminantes mediante varios procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización (Stearman *et al.*, 2003). Reemplazan así el tratamiento secundario e inclusive, bajo ciertas condiciones, al terciario y primario de las aguas residuales.

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante. En conjunto, estos elementos

eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual (Reed en Kolb, 1998) y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos (Hu en Kolb, 1998).

Los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento (Lara, 1999).

La fitodepuración, en este caso, se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas) en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean éstos naturales o artificiales. El término macrófitas, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos (Fernández *et al.*, 2004). Constituyen “fitosistemas”, porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales. Al realizar la planta sus funciones vitales, colabora en el tratamiento de las aguas.

Clasificación de los humedales artificiales

Los humedales artificiales pueden ser clasificados según el tipo de macrófitas que empleen en su funcionamiento: macrófitas fijas al sustrato (enraizadas) o macrófitas flotantes libres.

Considerando la forma de vida de estas macrófitas, los humedales artificiales pueden ser clasificados en:

Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes: principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*) son las especies más utilizadas para este sistema.

Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas: comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.

Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes: en suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos (Cricyt, 2007).

Los humedales basados en macrófitas enraizadas emergentes pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee: 1) humedales de flujo superficial, si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas y 2) humedales de flujo subsuperficial, si el agua circula por debajo de la superficie del estrato del humedal.

En la figura 1 sintetizamos los distintos tipos de humedales artificiales:

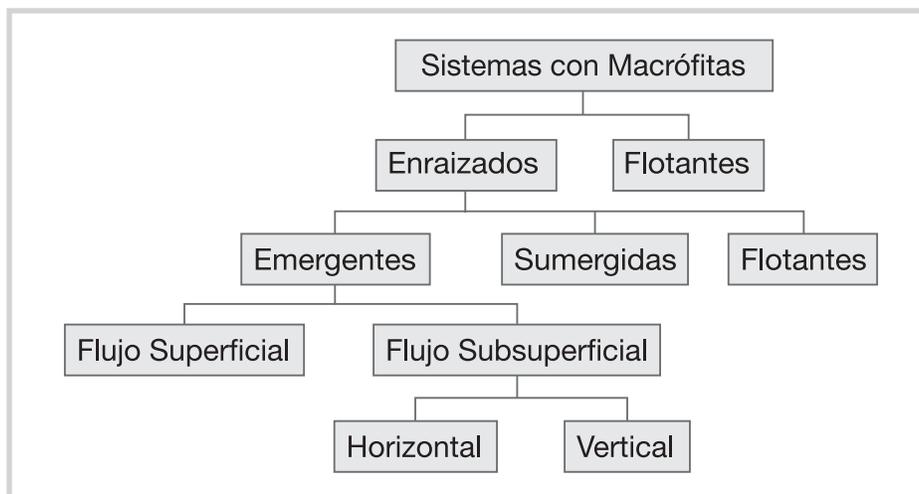


Figura 1. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.

A continuación desarrollaremos las características de los humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial, basados en macrófitas enraizadas emergentes, por ser los que interesan en nuestro caso.

Humedales artificiales de flujo superficial

Los sistemas de flujo superficial (conocidos en inglés como *surface flow constructed wetlands* o *free water surface constructed wetlands*) son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0,6 m) y tienen plantas (figura 2).

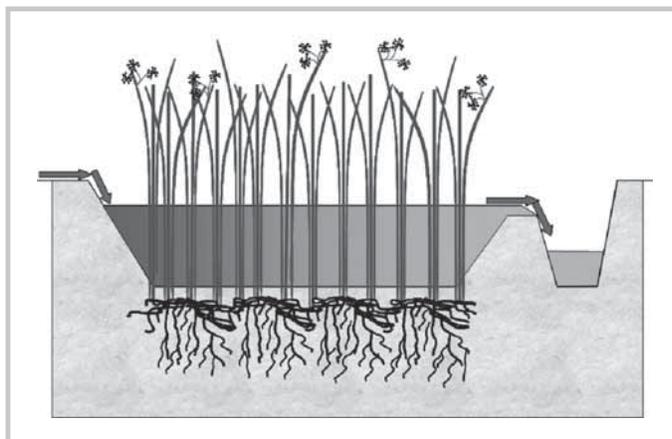


Figura 2. Humedal artificial de flujo superficial.

En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden constituirse, en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen.

Humedales de flujo subsuperficial

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

Humedales subsuperficiales de flujo horizontal.

Son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en la investigación de Seidel (1967) y Kickuth (1977). El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Brix en Kolb, 1998).

El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 % (figura 3).

El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño.

El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm.

La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, en entre 3 mm a 32 mm.

Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento.

Humedales subsuperficiales de flujo vertical

Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. Hay muchas posibilidades de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama matriz, etcétera, y los resultados que se han obtenido son promisorios (Kolb, 1998).

También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua (figura 4).

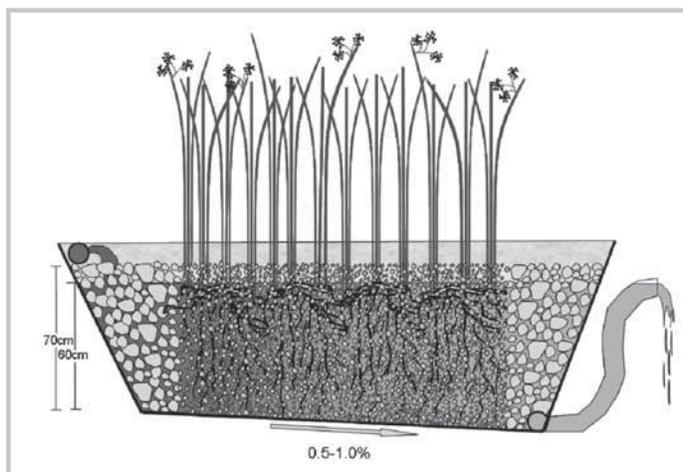


Figura 3. Humedal subsuperficial de flujo horizontal (vista corte sección).

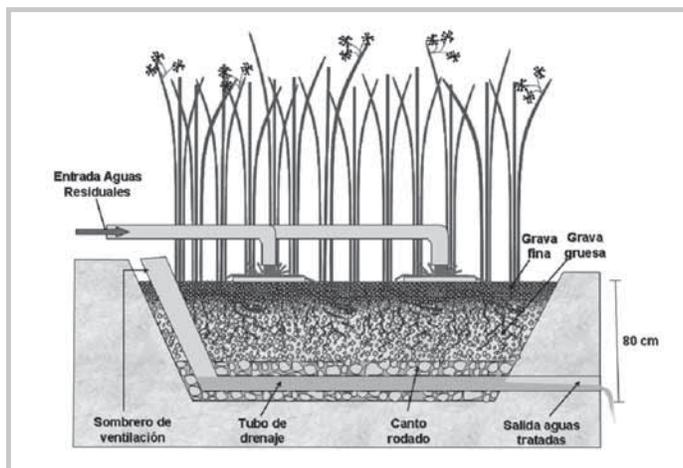


Figura 4. Humedal subsuperficial de flujo vertical (vista corte sección).

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

Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo.

Partes de los humedales de flujo subsuperficial

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

Agua residual

Las aguas residuales son las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población. Después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por una red de alcantarillado que las conducirá hacia el humedal, en este caso (Mara en Rolim, 2000).

Según su uso precedente, estas aguas resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con residuos de industrias, de actividades agrícolas, así como las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación (Mendonça en Rolim, 2000). Los contaminantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales

Contaminantes	Importancia
Sólidos suspendidos	Los sólidos suspendidos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias, cuando los residuos no tratados son lanzados al ambiente acuático
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Por lo general, se mide en términos de DBO y DQO. Si es descargada sin tratamiento al medio ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo de las fuentes de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas
Microorganismos patógenos	Los organismos patógenos existentes en las aguas residuales pueden transmitir enfermedades.
Nutrientes	Cuando son lanzados en el ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando son aplicados al suelo en cantidades excesivas, pueden contaminar también el agua subterránea.
Compuestos tóxicos	Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de su conocimiento o sospecha de carcinogenicidad, mutanogenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de esos compuestos se encuentran en las aguas residuales.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Ejemplos típicos incluyen detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son normalmente adicionados mediante actividades humanas. Tienen una alta persistencia en el ambiente, lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad.
Sólidos inorgánicos disueltos	Componentes inorgánicos, como calcio, sodio y sulfato, deben ser removidos si se va a usar nuevamente el agua residual. por ser potenciales degradadores del suelo

Fuente: Metcalf y Eddy en Rolim, 2000.

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

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
- Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación del suelo y transpiración de las plantas).
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de raíces y rizomas y bloqueando la exposición al viento y al sol.

Sustrato (medio granular)

En los humedales, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico.

La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos.

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

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal (Lara, 1999).

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

El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende en el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar (Arias, 2004).

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

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

Vegetación

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos foto autótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004).

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

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

En el cuadro 4 se resumen las características de las tres especies más utilizadas en los humedales artificiales.

Cuadro 4. Características de las especies vegetales más utilizadas en humedales artificiales.

Nombre Científico	Familia	Nombre (s) común (es)	Características sobresalientes	Distancia de siembra	Penetración de raíces en grava	Temperatura C		Salinidad ppt	pH
						Deseable	Germinación de semillas		
<i>Thypha spp</i> 	Tifácea	Espadaña, Enea, Anea, Junco, Bayón, Bayunco, Bohordo, Henea, Junco de la pasión, Maza de agua	Ubicua en distribución Capaz de crecer bajo diversas condiciones medio ambientales Se propaga fácilmente Capaz de producir una biomasa anual grande Tiene potencial pequeño de remoción de N y P por la vía de la poda y cosecha.	60 cm	Relativamente pequeña (30 cm) por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	10-30	12-24	30	4 – 10
<i>Scirpus spp</i> 	Ciperácea	Totora	Perennes Crecen en grupo Plantas ubicuas Crecen en aguas costeras, interiores salobres y humedales Crecen bien en agua desde 5 cm hasta 3 m de profundidad	30 cm	60 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	18 -27		20	4 – 9
<i>Phragmites spp australis más común</i> 	Gramínea	Carrizo	Anuales Altos Rizoma perenne extenso Plantas acuáticas usadas más extensas Pueden ser más eficaces en la transferencia de oxígeno porque sus rizomas penetran verticalmente y más profundamente. Son muy usadas en humedales porque ofrecen un bajo valor alimenticio	60 cm	40 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	12-23	10-30	45	2 – 8

Fuente: Extractado de Lara, 1999

Microorganismos

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

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

Mecanismos de remoción de contaminantes

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

En el siguiente cuadro, se muestran los principales procesos y mecanismos que ocurren en los humedales construidos.

Cuadro 5. Mecanismos de remoción en los sistemas de tratamiento basados en macrófitas.

Parámetro evaluado	Mecanismos de remoción
Sólidos suspendidos	- Sedimentación/filtración
DBO	- Degradación microbiana (aeróbica y anaeróbica). - Sedimentación (Acumulación de material orgánica/lodo en la superficie del sedimento)
Nitrógeno Amoniacal	- Amonificación seguida por nitrificación y desnitrificación amoniacal - Captado por la planta
Patógenos	- Sedimentación/filtración - Declinación - Radiación ultravioleta - Excreción de antibióticos por las raíces de las macrófitas

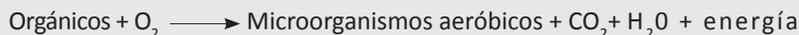
Fuente: Brix, 1993; citado por Kolb, 1998

A continuación se explican los mecanismos de remoción de contaminantes que ocurren en los humedales construidos, cuyo contenido está basado principalmente en el texto de Kolb (1998).

Remoción de sólidos suspendidos

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en el tratamiento previo, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, complementando esta remoción. En efecto, las raíces de las macrófitas y el sustrato reducen la velocidad del

agua, favoreciendo ambos procesos. El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal.



Remoción de materia orgánica

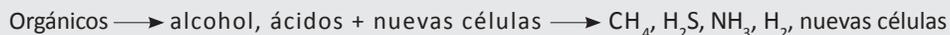
La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos (Brix en Kolb, 1998).

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

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

En la degradación aeróbica, dos grupos de microorganismos participan en este proceso de degradación: aeróbicos quimioheterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio; y aeróbicos quimioautótrofos, los cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato. El último proceso es llamado nitrificación. Sin embargo, debido a la tasa de metabolismo más alta, los heterótrofos son principalmente responsables para la remoción del material orgánico; por lo tanto, la presencia de oxígeno disuelto es un factor limitante.

La degradación anaeróbica puede ser resumida como sigue:



Éste es un proceso de cuatro pasos, realizado por heterótrofos anaeróbicos. Es menos eficiente comparado a la degradación aeróbica, pero predominará si el oxígeno no está disponible (Cooper, 1996).

Remoción de nitrógeno

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

La amonificación ocurre en las zonas aeróbicas, como también en zonas anaeróbicas, por la mineralización del nitrógeno contenido en los orgánicos (figura 5).

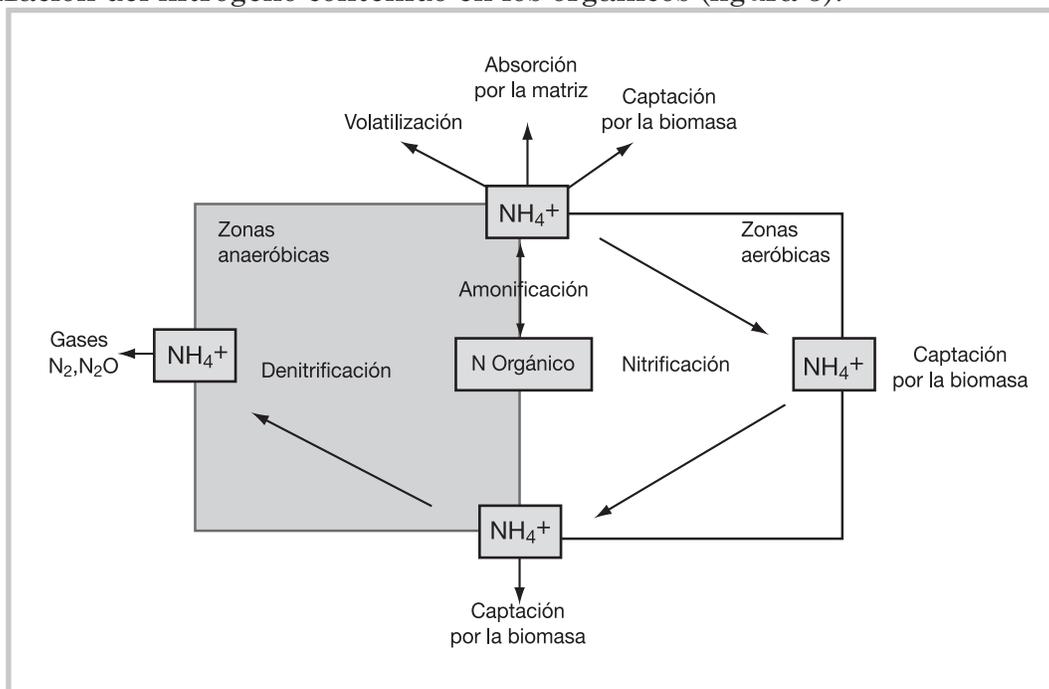


Figura 5. Diagrama del metabolismo del nitrógeno (Cooper et al., 1996).

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

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



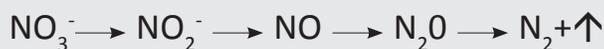
En este paso, la liberación de iones de hidrógeno baja el pH, por lo que es necesario un medio fuertemente alcalino para mantener un pH en el rango de 7.5 a 8.6 (Cooper, 1996). El género bacteriano que es considerado para catalizar esta reacción es Nitrosomas, en cambio el género Nitrobacter es responsable para la transformación de nitrito a nitrato.



Toda la reacción necesita un alto ingreso de oxígeno: alrededor de 4.5 kg por cada kg de amonio-nitrógeno ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) oxidado. Las bacterias son sensibles a un amplio rango de inhibidores; así, altas concentraciones de nitrógeno amoniacal son inhibidores. También concentraciones de oxígeno disuelto por más de 1 mg O_2/l son requeridos y temperaturas por debajo de 100 °C reducen el desempeño significativamente.

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

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



Los tres productos son gaseosos, pero mayormente el gas nitrógeno es perdido en la atmósfera debido a que los primeros dos productos son pasajeros en la mayoría de los casos. Similar al proceso de nitrificación, la denitrificación es también fuertemente dependiente de la temperatura y es necesario suficiente carbono como fuente de energía para que la bacteria realice la conversión.

Remoción de fósforo

El fósforo está presente en la alcantarilla en tres distintas formas: como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El último es un constituyente menor de la alcantarilla y como los polifosfatos, requieren una posterior descomposición a una forma de ortofosfato más asimilable. Cerca del 25% del fósforo total fijado en la alcantarilla está presente como ortofosfatos tales como: PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4 , que están disponibles para el metabolismo biológico inmediato. Por lo tanto, en términos de utilización, en la planta de tratamiento lo que importa es la concentración de fosfato orgánico antes que la concentración de fósforo total (Gray, 1989).

La remoción de ortofosfato ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, complejización y reacciones de precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en la matriz del sustrato. El consumo de fósforo por la planta puede ser considerado como insignificante comparado con los efectos de adsorción, valores de alrededor del 3% de la carga anual han sido reportados (Boerner en Kolb, 1998). Dependiendo del valor de pH dentro del sustrato, el fósforo está presente en la forma de sal soluble o minerales insolubles, lo cual significa que el fósforo puede ser transferido dentro de un humedal construido. Debido al contenido de óxidos metálicos en el sustrato, la fijación de fósforo como fosfatos por medio de la adsorción varía (Wissing en Kolb, 1998).

Remoción de metales pesados

Los metales traza tienen una alta afinidad para la adsorción y complejización con material orgánico y se acumulan en la matriz de un humedal construido. Los metales pueden encontrarse en formas solubles o como partículas asociadas, siendo las primeras las formas más biodisponibles.

Los procesos físico químicos tales como la adsorción, precipitación, complejación, sedimentación, erosión y difusión, determinan la distribución entre las partículas y las fases disueltas. Los parámetros específicos que controlan la sedimentación en el agua incluyen la relación de flujo/sólidos suspendidos, condiciones óxicas/anóxicas, fuerza iónica, pH, contenidos de carbono orgánico particulados y disueltos, concentraciones de ligantes inorgánicos y orgánicos y movilización de metales mediante reacciones bioquímicas. Desafortunadamente, la resolubilización de metales desde los humedales construidos es una causa de preocupación (Cooper, 1996).

La adsorción involucra la unión de las partículas (o sustancias disueltas en solución), en partes de la planta o a la superficie de la matriz. En una reacción de intercambio catiónico,

los iones metálicos positivamente cargados en solución se unen a los sitios negativamente cargados en la superficie del material adsorbente.

La fuerza atractiva para el intercambio catiónico es electrostática y la medida de esta fuerza depende de un amplio rango de factores. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un material es una medida del número de puntos de unión por masa o volumen.

En cuanto a los procesos microbianos mediados, es necesario tener en cuenta que en un humedal construido se pueden distinguir dos zonas: la zona aeróbica, que contiene una alta proporción de material orgánico y la zona anaeróbica, dominada por materia inorgánica. Entre estas dos principales zonas también existen zonas anóxicas. La presencia de bacterias que oxidan metales en las zonas aeróbicas y bacterias que reducen sulfatos en las zonas aeróbicas, que causarán la precipitación de óxidos de metal y sulfatos respectivamente, ha sido establecida por Cooper (1996).

Remoción de bacterias

Los organismos importantes, desde el punto de vista de la salud pública son las bacterias patógenas y los virus. Todos los patógenos son capaces de sobrevivir al menos un corto tiempo en agua natural, y más aún, en agua con temperaturas más frías y con presencia de polución orgánica (como en las aguas residuales).

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta. Los mecanismos biológicos incluyen, como se mencionó antes, predación y ataque por bacteriófagos y también la muerte (declinación *die-off*).

Finalmente, los factores químicos son la oxidación, adsorción y la exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas (aunque la cantidad de estos antibióticos causa dudas respecto a su efectividad para afectar a los patógenos).

Vymazal et al. (en Kolb 1998) reportaron remoción de bacterias (coliformes fecales) y enterobacterias en varios humedales en la República Checa, siendo la eficiencia de remoción entre 98% a 99% para estos indicadores bacterianos. En los casos en que se registraron las tasas más bajas, fue debido a tiempos de retención menores.

Funciones de las macrófitas en los mecanismos de remoción

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

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

Además, proveen buenas condiciones para la filtración física y una superficie grande para el crecimiento microbiano adjunto. Otra de sus propiedades es la transferencia de oxígeno a la rizósfera, aunque las estimaciones sobre la cantidad de esta transferencia de oxígeno varían en un amplio rango.

El consumo de nutrientes por la planta no juega un rol importante y solamente tiene que ser considerado en el caso de cosecha del tejido de la planta. Otro hecho importante, especialmente en climas templados, es la capacidad de aislamiento térmico de las macrófitas. En invierno, la capa de tejido muerto que cubre la superficie protege del frío y por lo tanto de las disminuciones de temperatura del agua residual.

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

Ventajas y desventajas de los humedales artificiales

Para conocer las ventajas y las desventajas que tienen los diferentes tipos de humedales artificiales, se presentan a continuación dos cuadros comparativos. El primero compara humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial (cuadro 6), y el segundo compara humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical y horizontal (cuadro 7).

En términos de costos, los humedales artificiales superficiales requieren menor inversión en relación a los de flujo subsuperficial ya que en los primeros no se incurren en los gastos mayores: la impermeabilización y la provisión y colocación del sustrato de grava.

Cuadro 6. Comparación entre diferentes sistemas de flujo humedal.

	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
Tratamiento	Tratamiento de flujos secundarios (aguas ya tratadas por otros medios, ej. Lagunas, biodiscos, fangos activados, etcétera).	Para tratar flujos primarios (aguas pre tratadas ej. Tanques IMHOFF, pozos sépticos).
Operación	Opera con baja carga orgánica	Altas tasas de carga orgánica.
Olor	Puede ser controlado	No existe
Insectos	Control es caro	No existe
Protección térmica	Mala, las bajas temperaturas afectan al proceso de remoción	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo el agua mantiene una temperatura casi constante
Área	Requieren superficies de mayor tamaño	Requieren superficies de menor tamaño
Costo	Menor costo en relación al subsuperficial	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%
Valor ecosistema	Mayor valor como ecosistemas para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna	Menor valor como ecosistema para la vida, el agua es difícilmente accesible a la fauna.
Usos generales	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas	Tratamiento de aguas residuales, principalmente para casas aisladas y núcleos menores de 200 habitantes.
Operación	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usadas para tratamiento terciario y mejoramiento de calidad agua)	Puede usarse como tratamiento secundario.

Cabe destacar que los sistemas de flujo horizontal tienen mayor riesgo de colapsar en términos de circulación del agua (taponamiento del sustrato), por tanto requieren que el agua a tratarse tenga menor material en suspensión.

En cuanto a la operación, en términos generales, ambos tipos requieren baja intensidad, pero continua, aunque no debe confundirse requerimientos mínimos con ningún requerimiento.

Cuadro 7. Comparación entre humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical.

	HORIZONTAL	VERTICAL
Funcionamiento	Continuo	Discontinuo
Estado oxidación	Más reducido	Más oxidado
Eficiencia	Más superficie	Menos superficie
Carga superficial	4-6 g DBO5/m ² ·d	20-40 g DBO5/m ² ·d
Nitrificación	Complicada	Se consigue
Operación	Sencilla	Más compleja

Fuente: Folch, s.f.

2.

La totora planta fitodepuradora

Una de las macrófitas más conocidas y difundidas en nuestro medio es la Totora (*Scirpus californicus*). Esta especie fue traída del Lago Titicaca a la Laguna Alalay, donde forma parte de la flora presente en la laguna y también se encuentra en abundancia en las zonas de inundación de la planta de tratamiento de Alba Rancho. Esta macrófita, forma parte de la amplia gama de plantas fitodepuradoras empleadas en los sistemas no convencionales de depuración de aguas residuales.

En este apartado presentamos las características de la totora como agente depurador. Asimismo, se presentan algunos resultados de la experiencia sobre su implantación en grava, realizada en Punata, dentro del marco del proyecto: “Zonas húmedas construidas para la depuración de aguas residuales en el municipio de Punata”, el cual pretende probar precisamente zonas húmedas construidas con totoras, para depurar aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento con lagunas de estabilización, ubicada en la comunidad de Tajamar Centro, sudoeste del municipio de Punata.

Características generales de la totora

El tipo de humedal artificial al que nos referiremos en es de flujo subsuperficial, por lo que nos centraremos en la descripción de las plantas que se usan en dicho tipo de humedal: las helófitas y en particular la totora.

La helófitas son plantas adaptadas a condiciones de saturación de humedad e inundación, siempre que el agua no las cubra completamente (figura 6). Es decir, soportan una fuerte limitación en la disponibilidad de oxígeno en el suelo. Comprenden una parte debajo del nivel del agua, y otra parte aérea.

El papel de las helófitas en los humedales artificiales se resume en los siguientes aspectos:

- Servir de filtro para mejorar los procesos físicos de separación de partículas (Valdés *et al.*, 2005).

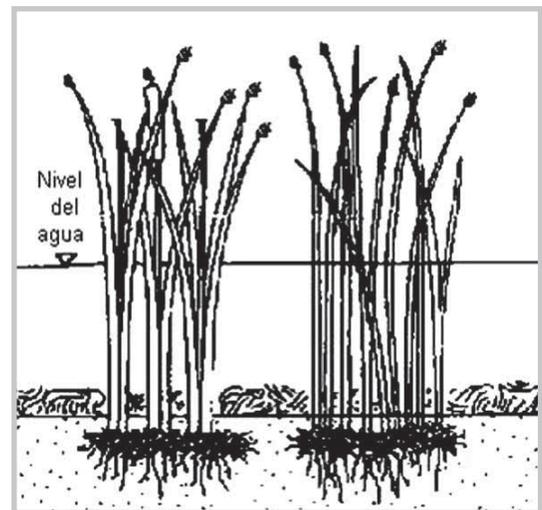


Figura 6. Plantas heliófitas en medio acuático.

- Asimilación directa de nutrientes (en especial Nitrógeno y Fósforo) y metales, que son retirados del medio e incorporados al tejido vegetal (Lahora Cano, 2004).
- Actuar a modo de soporte para el desarrollo de biopelículas de microorganismos, que actúan purificando el agua mediante procesos aerobios de degradación (Valdés *et al.*, 2005).
- Transportar grandes cantidades de oxígeno desde los tallos hasta sus raíces y rizomas, donde es usado por dichos microorganismos (Lahora Cano, 2004).

Además del oxígeno en la zona radicular, las bacterias son favorecidas por exudados de las plantas en la misma zona (Stengel en Soto *et al.*, 1999).

Las helófitas más usadas en depuración son *Typha*, *Scirpus*, *Phragmites* y *Carex* (Lahora Cano, 2004). Si bien existen pequeñas diferencias en la eficiencia de remoción de contaminantes entre dichas especies, la recomendación es *utilizar la especie de mayor adaptación y disponibilidad en el medio*.

Scirpus californicus, comúnmente conocida como totora, es la especie que se encuentra en mayor proporción en el Valle Central cochabambino (Laguna Alalay, zonas de inundación de Alba Rancho y otros cauces de agua naturales).

Su clasificación sistemática es (Navas, 2001):

Reino:	<i>Plantae</i>
División:	<i>Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Liliopsida</i>
Orden:	<i>Cyperales</i>
Familia:	<i>Cyperaceae</i>
Género:	<i>Scirpus</i>
Especie:	<i>Scirpus californicus tator</i>

Características morfológicas

La totora y las helófitas en general son ancestros directos de los denominados “vegetales vasculares” y por tanto, muy similares (figura 7).

Tienen epidermis muy delgadas a fin de reducir la resistencia al paso de gases, agua y nutrientes y tejidos; grandes espacios intercelulares que forman una red de conductos huecos en los que se almacena y circula aire con oxígeno. Esto permite la transferencia de oxígeno desde el aire y órganos fotosintéticos, y desde ahí hacia las raíces (Fernández *et al.* 2004).



Figura 7. Totora en la ribera de una laguna.

Rizomas

La totora tiene rizomas, que son tallos subterráneos que crecen paralelamente a la superficie del suelo. Éstos presentan a un lado raíces adventicias y al otro ramas hacia la superficie con hojas y yemas (Aycachi Inga, 2004).

Acumulan reservas, con lo que aumentan su volumen, y en épocas favorables las yemas aprovechan esas reservas para germinar (figura 8).

Tallos

Varían de 1 m a 4 m, erectos, remotos o próximos entre sí; lisos, trígonos o subteretes, verde-amarillentos cuando secos. Presentan vainas foliares pardo oscuro, sin láminas (figura 9).

Los tallos tienen aerénquimas, que son tejidos sin color con grandes espacios intercelulares llenos de aire, que facilitan la flotación y la llegada de aire a los órganos sumergidos (figura 10).

En las plantas vasculares, los tejidos de conducción están asociados a células parenquimáticas y tejidos de sostén. Se agrupan en pequeños haces conductores, que son de dos clases:

Xilema

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

Floema

El floema está constituido por tubos o células cribosas. Entre las células existen tabiques con agujeros o cribas que se obturan a bajas temperaturas y dificultan la conducción de sustancias orgánicas (figura 11).



Figura 8. Raíces y brotes de la totora.



Figura 9. Tallo de totora.



Figura 10. Corte transversal del tallo de totora.

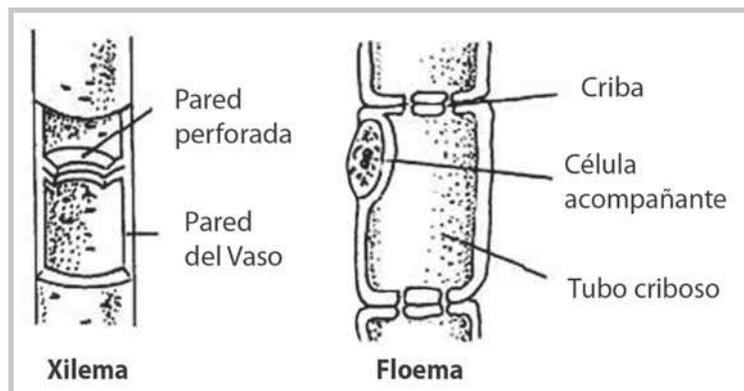


Figura 11. Corte longitudinal del xilema y el floema en la totora.

Inflorescencia

La inflorescencia es decompuesta (figura 12). Brácteas hasta 10 cm; bracteolas hasta 5 cm. Espiguillas de 3 mm, ovoides, agudas, agrupadas, rojizo glanduloso. Aquenios oblongos, amarillentos o pardo oscuro; escamas irregularmente plumosas (Navas, 2001).



Figura 12. Inflorescencia de la totora.

Reproducción

En la mayoría de los casos, la totora se reproduce vegetativamente. La reproducción por semillas es muy limitada debido a que generalmente no logran germinar.

La reproducción vegetativa es por desarrollo de propágulos vegetativos; o sea, mediante células especializadas en propagar la planta (meristemos), agrupadas en estructuras especiales (rizomas). De esta manera se producen individuos nuevos, pero adaptados al medio ambiente.

Capacidad depuradora de la totora

Se tiene referencia de algunos estudios sobre la capacidad depuradora de los humedales con totora. En el cuadro 8 se presentan algunos resultados al respecto.

Cuadro 8. Capacidad depuradora de humedales con totora (*Scirpus spp.*).

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

* % de reducción de los valores de los parámetros luego del paso por un humedal subsuperficial.

El funcionamiento de los humedales no es totalmente comprendido. Existen muchas discrepancias en diferentes aspectos: dimensionamiento, operación, etcétera, incluyendo la capacidad depuradora de las especies implantadas. Las discrepancias incluyen diferencias aún en el uso de plantas en los humedales. Varios autores afirman que los resultados obtenidos con el uso de fitosistemas son mejores que los obtenidos con un sistema igual pero sin plantas. Stearman et al. (2003) reporta reducción de contaminantes en general, de más del 20% en humedales implantados respecto a los no implantados.

Sin embargo, existen también estudios que no registraron diferencias entre el rendimiento de humedales plantados y no plantados. M. García et al. (2004) indican que no existen diferencias estadísticamente significativas, entre humedales subsuperficiales plantados y no plantados, en indicadores fecales y remoción de bacterias.

Adicionalmente, el potencial depurador de los humedales varía estacionalmente. Ello puede ser explicado tanto por simples variaciones meteorológicas, como por cambios producidos en la fisiología de las plantas. Soto *et al.* (1999) reportan que en verano aumenta la actividad de la planta, por tanto su capacidad de tratamiento de diversos factores (remoción de fósforo, fosfatos y nitrógeno). Zúñiga *et al.* (2004) reportan una fuerte variación en la remoción de

amoníaco y fósforo entre primavera e invierno, siendo mejores los resultados en humedales plantados que en humedales sin plantas. M. García *et al.* (2004) indican que hay una mayor remoción de indicadores fecales y bacterias en verano que en invierno. Según Álvarez y Bécares (2005) el efecto de la vegetación es significativo en la eliminación de la contaminación, para aguas residuales diluidas (tratamiento previo de desbaste y laguna facultativa).

De lo anterior se puede concluir que las plantas aumentan la depuración en los humedales cuando las condiciones climatológicas, de tratamiento previo y calidad de agua a ser tratada, no son tan extremas como para salir de su rango de tolerancia.

De cualquier forma, la capacidad de extracción de nutrientes puede estimarse en función de la composición de sus tejidos; los contenidos en N y P de parte aérea y parte subterránea son, respectivamente del orden de 1,6% N y 0,12% P, y 1,2% N y 0,18% P (Fernández *et al.*, 2004).

Finalmente, es necesario mencionar que los humedales artificiales, independientemente de la especie heliófita utilizada, tienen en general baja eficiencia en la remoción de nutrientes (sobre todo todo en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal), pero una alta eficiencia de remoción de DBO y DQO, así como en la fijación de metales pesados y moderada a alta eficiencia en la eliminación de coliformes fecales.

Adaptación de la totora

Las especies helófitas tienen un gran rango de adaptación; por ello es que constituyen las especies dominantes en lugares donde las condiciones restringen las posibilidades de desarrollo de otras especies.

Son plantas de climas templados que prosperan en posiciones soleadas, tolerando un amplio rango de pH (4 - 9). La temperatura media óptima para su desarrollo está dentro del intervalo de 16 °C a 27 °C. Se utilizan principalmente en humedales artificiales de flujo subsuperficial (lecho de grava/arena), ya que su tolerancia a la inundación permanente es poca cuando la capa de agua es profunda (Málvarez, 1999). Prospera muy bien en medios acuáticos de profundidad somera como lagunas o zonas de inundación.

Manejo de la totora en los humedales

El manejo en los humedales se puede centrar en tres aspectos centrales: implantación, operación y control de plagas y enfermedades.

Implantación

En los sistemas menores de 0,8 ha, la vegetación puede trasplantarse de fuentes cercanas u obtenerse de forma comercial.

La implantación en los humedales artificiales (figura 13) se efectúa usualmente por división de mata. Es recomendable que las plantas madres procedan de poblaciones naturales de la zona, a fin de asegurar su adaptación al lugar (Fernández *et al.*, 2004).

Las plantas se desarraigan del sustrato, se fraccionan de modo que cada porción lleve en su parte subterránea rizomas. Se implantan



Figura 13. Totora implantada a densidad óptima.

individualmente en el sustrato o fango del humedal en primavera o épocas calurosas, porque el frío puede matarlas (Hazelip, 2004). El tamaño de los rizomas debe ser de 10 cm de largo y tener brotes en el extremo del corte. La raíz debe colocarse a 5 cm por debajo de la superficie del medio. Los tallos de las plantas pueden ser recortados antes del trasplante.

Posteriormente, el lecho debe inundarse con agua hasta la superficie o rociarse con frecuencia, pero siempre se debe tener el cuidado de que el nivel del agua no sobrepase la altura de las plantas cortadas. Si las plantas se recubren de agua antes que desarrollen las raíces, se pudrirán (Hazelip, 2004).

Es importante que las raíces se desarrollen dentro del medio. Las profundidades características a las que las plantas echan raíces van de 18 a 36 cm. Después de la implantación inicial, el nivel de agua debe descender, de manera que las raíces se extiendan hacia el fondo del medio (Fernández et al. 2004).

La densidad de siembra óptima es cada 0,5 m. En cualquier caso, se debe permitir que la vegetación crezca de 3 a 6 meses antes de que empiecen las aplicaciones regulares de agua residual (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Operación

La operación básicamente consiste en la cosecha y el deshierbe y varía según el tipo de humedal (figura 14). En humedales de flujo superficial la cosecha o corte se realiza para evitar la incorporación de materia orgánica adicional al agua y el reciclado de nutrientes absorbidos por las plantas (Crites y Tchobanoglous, 2000). En humedales subsuperficiales de flujo vertical se debe hacer el deshierbe durante el primer año. Una vez que las plantas están establecidas, esta operación deja de ser necesaria. En otoño de cada año se debe segar y evacuar la parte aérea de las plantas. La evacuación permite evitar su acumulación en la superficie de los filtros (OIA, 2001).



Figura 14. Zona húmeda construida con totora.

En humedales de flujo horizontal, se mantiene la misma recomendación del deshierbe, pero no así la del segado, porque los restos de vegetales muertos no dificultan el funcionamiento hidráulico del humedal; es más, permiten aislar térmicamente el sustrato, lo que es útil en invierno (OIA, 2001).

Sin embargo, en caso de que las especies superen su capacidad de retención de contaminantes, se procederá al corte de la parte aérea y eliminación del humedal. Se debe tener en cuenta que la época en la que los rizomas tienen menos reservas es hacia finales del verano, por lo que si se efectúa la siega, el vigor de las plantas se verá afectado. En épocas más tardías, (de marzo en adelante, y antes de la brotación) ya no es probable que el corte comprometa el crecimiento de la planta (EPA, 2000).

Plagas y enfermedades

Fernández *et al.*, (2004) indica que son plantas muy rústicas de las que no se tiene referencias de plagas y enfermedades en su aplicación en humedales artificiales.

Prueba de implantación de totora en grava

Al ser los humedales construidos una tecnología nueva en Bolivia, es también prácticamente nueva la propagación de la totora en medio compuesto por grava. Por esta razón se realizó una prueba de implantación de totora en dicho sustrato (similar al de los humedales subsuperficiales), aplicando técnicas basadas en recomendaciones y experiencias previas registradas en la bibliografía consultada, con el objetivo de evaluar sus características de adaptabilidad y la respuesta a este tipo de transplante.

Metodología

Recolección

Las especies fueron recolectadas en dos lugares diferentes: Zonas de inundación de Alba Rancho (AR) y riberas de la Laguna Alalay (AL). Ambas procedencias tienen características comunes: son humedales “naturales” de flujo superficial, alimentados por aguas contaminadas, de condiciones climatológicas similares a Punata y en las cuales existe una gran distribución de totoras.

Se extrajeron plantas completas, cuya parte aérea osciló entre 1 m a 2 m de altura, con rizoma desarrollado.

Para su conservación, hasta el momento de la plantación, se introdujeron los rizomas en bolsas plásticas oscuras con agua limpia (48 horas).

Medio de implantación

La totoras se plantaron en 4 turriles metálicos (de 50 cm de altura y un diámetro aproximado de 60 cm) cuyo interior fue llenado con grava (figura 15). Dichos recipientes contaban con una salida a la que fue conectada una manguera, con el fin de controlar el nivel del agua.



Figura 15. Siembra de totora en grava

Implantación

Las plantas fueron fraccionadas de manera que cada una tenía un rizoma de 10 cm de largo y la parte aérea se encontraba en uno de los extremos del corte. La raíz fue colocada a 5 cm de profundidad dentro del sustrato. Se llenaron los recipientes hasta que el agua alcanzó a las raíces, pero no afloró a la superficie.

En dos turriles se plantaron totoras provenientes de Alba Rancho, y en los otros dos las de Laguna Alalay (5 individuos por turril, a 25 cm unos de otros). Cada turril fue convenientemente identificado.

Se dejaron los recipientes en las cercanías de la planta de tratamiento de Punata.

Riego

La siembra se hizo el 24 de agosto del 2006 (fines de invierno) y, con ella, el primer riego, cuidando de que el agua no afluera en la grava (figura 16).



Figura 16. Riego luego de la siembra de la totora.

Los riegos se hicieron dos veces por semana (cada tres o cuatro días). A los 26 días después de la siembra se comenzaron a regar dos de las unidades experimentales (turriles) con agua proveniente de la laguna facultativa de la planta de tratamiento de Punata. En el par restante, se continuó esta operación con agua limpia.

Variables de respuesta

El principal parámetro evaluado fue el número de brotes nuevos en cada unidad experimental.

Al final de la prueba, se midieron seis parámetros morfológicos en las totoras: número de brotes por rizoma implantado, longitud de los brotes, presencia de inflorescencias, longitud y ancho de los rizomas, y longitud de las raíces.

Resultados obtenidos

Número de brotes

Los resultados obtenidos en cuanto al número de brotes en cada una de las unidades evaluadas, se resumen en el cuadro 9.

Cuadro 9. Resumen de los resultados de brotación.

Parámetro	AL1: Totora de Laguna Alalay regada con agua residual	AL2: Totora de Laguna Alalay regada con agua limpia	AR1: Totora de Alba Rancho regada con agua residual	AR2: Totora de Alba Rancho regada con agua limpia
Inicio brotación después de la siembra	11	18	18	14
Total días de la prueba	118	118	118	118
Nº total de brotes	28	10	27	39
Índice de brotación semanal	1,7	0,6	1,6	2,3

Nota. 5 individuos evaluados en cada prueba.

Como se puede apreciar en el cuadro anterior, considerando el índice de brotación semanal en todo el periodo de la prueba (118 días, aproximadamente 4 meses), el máximo valor reportado corresponde a la unidad AR2 (2.3), que son plantas de totora procedentes de Alba Rancho y fueron regadas con agua limpia. Cabe resaltar que esta unidad, a los 26 días también fue afectado por el ataque de vacas, aunque en menor grado.

Las dos unidades regadas con agua residual, de ambas procedencias (Laguna Alalay y Alba Rancho), reportan valores relativamente altos y casi similares (1,7 y 1,6 respectivamente). También estas unidades fueron atacadas por vacas, AL1 en tres momentos y AR1 en dos momentos.

Comparando ambas procedencias de las plantas de totora, se puede apreciar claramente en la figura 17 que las plantas procedentes de Alba Rancho tienen una tendencia de brotación mayor en relación a las plantas provenientes de Laguna Alalay, independientemente de si fueron regados con agua limpia o con agua residual.

Donde:

M1: Verificación de ataque de vacas e inicio de riego diferenciado.

M2: Ataque de vacas a las unidades experimentales AL1 y AL2.

M3: Ataque de vacas a todas las unidades experimentales.

Las unidades experimentales fueron atacadas por vacas a los 26 (M1), 50 (M2) y 95 (M3) DDS; es decir que perdieron brotes, aunque la incidencia fue mayor en la unidad AL2. A partir del día 26 se diferenció el riego: AL1 y AR1 con agua residual proveniente de la laguna facultativa de la planta de tratamiento de Punata, y AL2 y AR2 con agua limpia.

Cabe recalcar que la brotación en la unidad AL1 tuvo un “repunte” en la aparición de nuevos brotes a partir del día 95 hasta igualar a AR1 en el día 118.

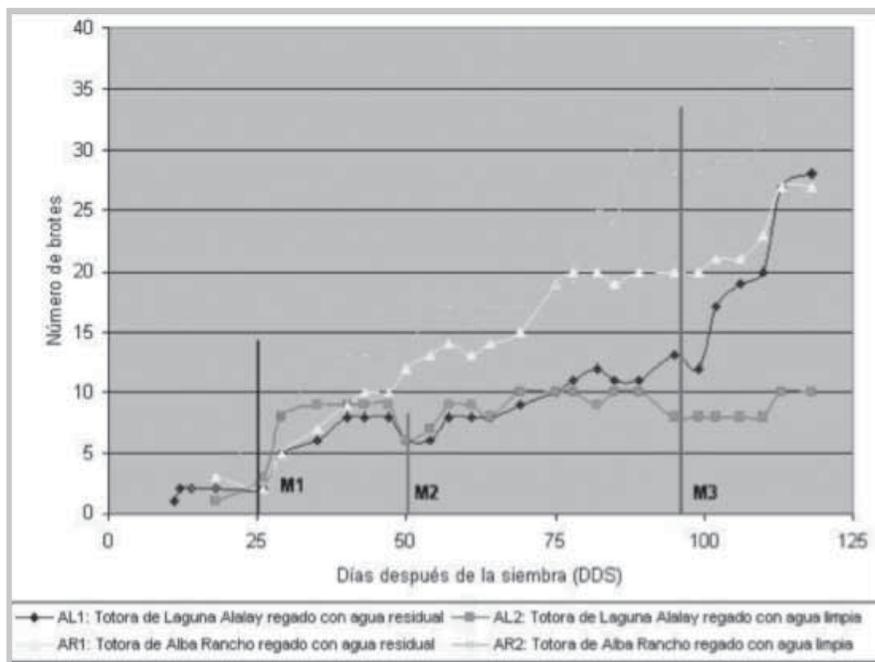


Figura 17. Evolución del número de brotes por cada unidad experimental.

Otros parámetros

Al finalizar la prueba se realizaron mediciones de algunos parámetros adicionales: Número de brotes promedio por rizoma, longitud de brotes y longitud de raíces (cuadro 10).

Unidades Experimentales	Número de brotes/rizoma (promedio)	Longitud brotes (cm)	Longitud raíces (cm)
AL1	7	37,9	19,2
AL2	3,3	14,6	9
AR1	6,8	36,4	14,1
AR2	7,8	43	17,5

Cuadro 10. Resultados de los parámetros iniciales evaluados.

En cuanto al número de brotes por rizoma, no hay diferencias significativas entre las unidades AL1, AR1 y AR2, que oscilan alrededor de 7 brotes/rizoma. En cambio en la unidad AL2, el número de brotes es bajísimo, alrededor de 50% menos (3.3 brotes/rizoma). Este resultado refleja el bajo comportamiento de esta unidad a lo largo de toda la prueba.

En cuanto a la longitud de los brotes, el comportamiento es similar. Siendo la más baja la de la unidad AL2 con 14,6 cm de longitud de brote promedio. En el resto de las unidades la longitud oscila entre 36,4 cm y 43 cm.

En la longitud de raíces, hasta el final de la prueba se aprecia un desarrollo comprendido entre 14,1 y 19,2 (AL1, AR1 y AR2). Esto quiere decir que las totoras alcanzarían la profundidad radicular de una planta adulta entre 7 y 8 meses, si crecieran con el ritmo de registrado en la prueba.

Conclusiones preliminares de la prueba

Por el comportamiento mostrado sobretodo de las unidades que fueron regadas con agua residual, se puede concluir que tanto las especies procedentes de la laguna Alalay como de Alba Rancho pueden ser empleadas en la implementación de los zonas húmedas construidas. No obstante, las plantas procedentes de Alba Rancho muestran una ligera superioridad en cuanto a vigor y número, sobretodo en la unidad regada con agua limpia.

De la misma forma, una vez implantadas, es mejor regarlas con agua limpia. Sin embargo, el riego con agua residual no es un impedimento definitivo en la brotación. De hecho, demostró un efecto favorable, a mediano plazo, sobre el número de brotes de las totoras provenientes de la Laguna Alalay, ya que se restablecieron, logrando igualar en el número de brotes a la unidad AR1.

El análisis de los parámetros morfológicos muestra que, en general, hubo poca diferencia en el rendimiento de AL1, AR1 y AR2. En el caso de AL2, de manera análoga al comportamiento en número de brotes, no demostró vigor comparable al de las demás unidades experimentales, pese a tener rizomas de dimensiones similares. Al parecer fue la más afectada con el ataque de las vacas en las tres ocasiones, por tanto no se pudo recuperar a lo largo de la prueba.

Un aspecto a resaltar de la prueba es que a pesar de que las unidades experimentales emulan en muchos aspectos a los humedales subsuperficiales, no proveen del todo condiciones adecuadas, fundamentalmente en circulación del agua, tiempo de retención y aereación.

Finalmente, la curiosidad de las vacas por una especie extraña y similar a una que les sirve de alimento, hacen pertinente proteger las zonas húmedas construidas para evitar los potenciales ataques de estos animales domésticos así como de otros que se encuentran en la zona.

Diseño y construcción de humedales artificiales

Diseño de humedales

El diseño hidráulico de un humedal es crítico para obtener buenos rendimientos en la eficiencia de depuración. En los modelos de diseño se asume un flujo en condiciones uniformes y de tipo pistón.

Para llegar a poder intentar acercarse al modelo ideal (flujo pistón) es muy importante realizar un cuidadoso diseño hidráulico y los métodos constructivos apropiados.

El flujo del agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales.

La energía para romper esta resistencia está dada por la pérdida de carga entre el ingreso y salida del humedal, para dar esta energía se le asigna al fondo del humedal una pendiente con una salida de altura variable.

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

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

Existen dos tipos de humedales de flujo subsuperficial:

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

Humedales sub superficiales de flujo Horizontal

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

- Cálculo del área necesaria.
- Profundidad del humedal.
- Pendiente.
- Sustrato.
- Relación largo – ancho

Cálculo del área superficial

El cálculo del área superficial se realiza en función al parámetro contaminante que se desea disminuir o remover, generalmente los diseños se realizan para disminución de la DBO₅.

El área superficial se calcula a través de la ecuación 1:

Ecuación 1: Determinación del área superficial

$$AS = \frac{Q \cdot LN\left(\frac{C_o}{C}\right)}{K_T \cdot h \cdot \eta}$$

Donde:

Q= caudal de diseño del humedal (m³/día)

C= concentración efluente (mg/l)

C_o= concentración afluente (mg/l)

K_T= Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (d-1)

h= profundidad del humedal (m)

η= porosidad del medio granular (porcentaje expresado en fracción)

La constante de reacción de primer orden se calcula mediante la Ecuación 2:

Ecuación 2: Constante de reacción de primer orden

$$K_T = 1,104 \cdot 1,06^{T_2 - 20}$$

Donde:

T₂= temperatura del agua (°C)

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

Sustrato

Es el medio donde crecen las plantas, los microorganismos y se realizan los principales procesos de depuración.

Para el diseño se recomienda utilizar grava con menos de 30 mm (3/4") de diámetro que parece ser la que funciona mejor.

Si se utiliza grava con diámetros muy grandes de sustrato, origina que se incremente la velocidad del paso del agua, resultando en un flujo turbulento y que no se cumpla la ley de Darcy para el diseño.

Caso contrario ocurre con grava de tamaño demasiado pequeño, esta reduce la velocidad del paso de agua originando zonas con presencia de agua en la superficie y flujos preferenciales, pero tienen la ventaja de proporcionar una mayor área superficial para la actividad microbiana y la adsorción.

En algunos casos se utiliza ciertos tipos de suelo (arcillas) para adsorber metales pesados, fosfatos, etcétera. El inconveniente es la gran reducción de la velocidad de paso del agua.

Antes del inicio del diseño se recomienda realizar pruebas de conductividad y porosidad del substrato (grava), esto para definir exactamente el tipo de material a emplearse. Asimismo, se recomienda multiplicar el valor de la conductividad por 1/3 o bien por 0.1 (10%) para evitar problemas de atascamiento por acumulación de lodos, raíces y otros.

Con relación a la uniformidad del material este debe tener un coeficiente de uniformidad entre 1 y 6.

En el cuadro 11 se muestra las características principales de los substratos usados en los humedales.

Cuadro 11. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales.

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Conductividad hidráulica, ks (m ³ /m ² /d)	Porosidad, n %
Arena gruesa	2	100-1.000	28-32
Arena gravosa	8	500-5.000	30-35
Grava fina	16	1.000-10.000	35-38
Grava media	32	10.000-50.000	36-40
Roca gruesa	128	50.000-250.000	38-45

Fuente: Elaboración propia.

Relación Largo – Ancho

Para calcular el ancho del humedal consideramos la ley de Darcy (ecuación 3), para flujo en medio poroso.

Ecuación 3: Principio de Darcy para flujo en medios porosos

$$A_c = \frac{Q}{(k_s * S)}$$

Donde:

A_c= área vertical en m²

Q= caudal medio en m³/s

K_s= Conductividad hidráulica (m/s)

S = pendiente (m/m)

El ancho del humedal (m) se determina en función al área vertical y la profundidad del nivel de agua a tratar (ver ecuación 4)

Ecuación 4: Cálculo del ancho del humedal

$$W = \frac{A_c}{h}$$

El largo del humedal se determina en función al ancho y al área superficial como se muestra en la ecuación 5:

Ecuación 5: Cálculo del largo humedal

$$L = \frac{A_s}{W}$$

Donde:

A_s = Área superficial del humedal (m^2)

W = ancho del humedal (m)

Posteriormente calculamos la relación largo-ancho (L/A). Mientras mayor es la relación largo-ancho se tiene mejor depuración de las aguas, pero se tiene problemas de cortocircuitos, flujos preferenciales, presencia de agua sobre el lecho de grava y otros.

Por ello se recomienda relación largo – ancho de: 2 a 1, 3 a 1 y 4 a 1

En el cuadro 12 se muestra un resumen de los principales parámetros de diseño de los humedales sub superficiales de flujo horizontal.

Cuadro 12. Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo horizontal.

Parámetros	Unidad	Intervalo	Valor usual
Tiempo de retención hidráulico	Días	4-15	7
Profundidad agua	M	0,1-0,8	0.6
Área	m^2/heq	2,5-5	
Carga orgánica	$gDBO_5/m^2 \cdot dia$	3-7,5	<11
Carga orgánica	$kg DBO_5/heq \cdot di$	<70	
Carga hidráulica	$m^3/m^2 \cdot dia$	0,1-0,2	
Características constructivas			
Grava ingreso salida	mm	50-100	50
Grava media	mm	3-6	19
		5-10	
		6-12	
Coefficiente uniformidad		3-5	<5
Profundidad medio	m	0.70-1.5	0.7
Pendiente	%	0-1	0.5
Relación largo - ancho		2:1 – 7:1	3:1
Drenaje			
Tubería perforada- tamaño	pulgada	3-4	4
Distribución de agua			
Tubería perforada - canal	pulgada	2-4	3

Fuente: Elaboración propia

Humedales sub superficiales de flujo vertical.

Existe poca información disponible sobre este tipo de humedales y hay numerosas ecuaciones descritas por investigadores para el cálculo del área superficial, pero generalmente el diseño está en función a las poblaciones equivalentes.

La aplicación del agua residual se realiza en forma intermitente, a través de unas tuberías que se colocan encima del lecho de grava o arena. Para un mejor funcionamiento de estos humedales, se debe considerar siempre en el diseño la construcción de dos humedales para que operen en paralelo, es decir, que cada humedal tenga un periodo de reposo y un periodo de aplicación de agua. El periodo de reposo óptimo es que por cada periodo de alimentación se tenga dos periodos de reposo.

La frecuencia de aplicación del agua residual se calcula considerando que no quede agua en la superficie procedente de la aplicación riego anterior. Esta forma de operación favorece la oxigenación del interior del lecho filtrante. Este proceso se realiza de la siguiente manera: la lámina de agua aplicada empuja el aire existente en el sustrato (porosidad), una vez que el agua aplicada se drena totalmente deja un espacio vacío que se llenará con aire, el cual será arrastrado en la siguiente aplicación. El aporte de oxígeno por las raíces de las plantas es despreciable.

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

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

Cálculo del área necesaria

El cálculo del área del humedal se realiza en función a: 1) la población equivalente y 2) si el humedal trabajará como tratamiento primario o secundario.

La población equivalente se puede definir como la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de cinco días (DBO 5) de 60 g de oxígeno por día (ver ecuación 6). De igual forma, la carga contaminante de las aguas grises, viene determinada por la suma de los habitantes equivalentes de las industrias asentadas en el municipio y que vierten a la red de colectores municipales

Ecuación 6. Fórmula para el cálculo de la población equivalente

$$\text{Población equivalente (hab)} = \frac{\text{DBO}_5 \text{ (mg/l)} * \text{Caudal (m}^3\text{/d)}}{60 \text{ grDBO}_5 \text{ /día*hab}}$$

El humedal trabaja como tratamiento primario cuando se aplica aguas residuales pretratadas, es decir, aguas que fueron sometidas a un pretratamiento físico (rejillas de desbaste y desarenador).

El humedal trabaja como tratamiento secundario, cuando las aguas residuales a aplicarse al humedal ya recibieron un tratamiento primario ya sea por un tanque séptico, reactor UASB, IMHOFF, lagunas anaerobias, u otro método. Para ambos casos se establecieron ecuaciones que determinan las áreas superficiales de los humedales, como se puede apreciar en la siguiente relación.

Humedal como tratamiento primario

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

Humedal como tratamiento secundario

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

Por su parte Crites y Tchobanoglous, (2000), calcula el área en base en la yasa hidráulica de aplicación (ver ecuación 7)

Ecuación 7: Cálculo del area superficial en humedal vertical

$$As = \frac{Q}{THA}$$

Y la tasa hidráulica de aplicación se calcula con la ecuación 8

Ecuación 8: Tasa hidráulica de aplicación

$$THA = \frac{TCH}{F}$$

Donde:

Q = caudal m³/día

THA= Tasa hidráulica de aplicación (mm/dosis)

TCH= Tasa de carga hidráulica (mm/día)

F = Frecuencia de dosificación (dosis/día)

Profundidad del humedal

La profundidad del humedal suele ser de unos 60 a 80 cm. El agua fluirá a través del medio poroso y se recogerá en una red de tuberías de drenaje situada en el fondo del lecho.

Pendiente

La pendiente de la superficie del humedal es plana (0%), este debe ser realizado con mucho cuidado para evitar que se formen charcos de agua sobre la superficie.

La pendiente del fondo o lecho del humedal varía de 0.5 a 2% pero generalmente se utiliza una pendiente ligera del 1%.

Sustrato

El sustrato está conformado por varias capas de material según el tipo de uso que se le dará al humedal (tratamiento primario o secundario) como se observa en el cuadro 13.

Cuadro 13. Características del sustrato para diseño de humedales verticales.

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

h= altura del humedal

Fuente: Elaboración propia.

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

Para humedales que funcionaran como tratamiento primario: coeficiente de uniformidad menor a 5; caudal de aplicación del agua residual debe ser mayor al caudal de infiltración; el agua residual contiene partículas suspendidas, por ende la conductividad hidráulica se reduce, teniéndose la expresión en la ecuación 9:

Ecuación 9: Cálculo de la conductividad hidráulica para tratamiento primario

$$K_{sf}=0,6*K_s$$

De la misma forma el cálculo del caudal de infiltración se muestra en la ecuación 10.

Ecuación 10: Cálculo del caudal de infiltración para tratamiento primario

$$Q_i=A_s*K_{sf}*3600$$

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

$$Q_i=A_s*K_s*3600$$

Donde:

Q_i = caudal de infiltración (m^3/h)

A_s = area superficial (m^2)

K_s = conductividad hidráulica (m/s)

En el cuadro 14 se muestra las principales características de los sustratos empleados para el diseño y construcción de humedales verticales.

Cuadro 14. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales verticales.

Tipo de material	Tamaño efectivo D ₁₀ (mm)	Conductividad hidráulica, ks (m ³ /m ² /d)
Arena gruesa	2	100-1.000
Arena gravosa	8	500-5.000
Grava fina	16	1.000-10.000
Grava media	32	10.000-50.000
Roca gruesa	128	50.000-250.000

Fuente: Elaboración propia.

La única condición de estos humedales es mantener una simetría rectangular o cuadrada, que la superficie del humedal tenga una pendiente de 0%. Las principales características de estos humedales se muestra en el cuadro 15.

Cuadro 15. Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo vertical.

Factor	Unidad	Intervalo	Valor usual
Medio Filtrante			
Arena fina lavada (secundario)	mm	0.25 – 0.75	0.35
Grava fina (primario)	mm	2.00 - 8.00	2 – 5 mm
Profundidad	cm	45 – 90	60
Coefficiente uniformidad	%	3 – 6	<4
Porcentaje finos	%	2-5	<4
		<4	<4
Drenaje			
Clase (tubería perforada)			
Tamaño	pulg.	3 – 4	4
Pendiente	%	0,1 – 1	0,5
Grava de drenaje	mm	20 - 40	40
Distribución agua			
Diámetro tubería	pulg	1-2	1.5
Distancia entre tuberías	m	0,5 -1,2	0,6
Orificio distribución	mm	3 – 8	6
Distancia entre orificios	m	0,5 - 1,2	0,6
Parámetros de diseño			
Carga hidráulica	l/m ² *d	40 – 60	50 < 0,005
Carga orgánica	kg DBO/m ² *d	0,0025 – 0,01	
Dosificación			
Frecuencia	Veces/d	4 – 24	12
Volumen/orificio	l/orif.*dosis	0,6 – 1,1	0,9
Tiempo aplicación	minutos	2-15	5

Fuente: Elaboración propia.

Además del diseño hidráulico, se tiene que considerar el diseño de las tuberías de aplicación de agua, potencia de bomba, el diseño de la red de tuberías de drenaje, tiempo de operación y aplicación de las aguas residuales al humedal.

Construcción de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical y horizontal

Esta tecnología natural de depuración de aguas residuales, ha mostrado ser una muy buena alternativa para ser empleada en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de pequeños núcleos urbanos. Es por eso que la mayoría de los pequeños poblados de Europa han optado por construirlos, principalmente por su aspecto natural, poca o nula energía para su funcionamiento, de fácil operación y bajos costos de mantenimiento, comparado con otros sistemas. En Cochabamba se han construido hasta la fecha, cuatro humedales artificiales de flujo subsuperficial, dos de ellos de flujo vertical y dos de flujo horizontal.

De forma similar a muchas actividades de construcción y en base a la experiencia adquirida en la construcción de los mencionados humedales, para su implementación se sugieren seguir los siguientes pasos:

1. Reconocimiento del terreno.
2. Estudios geotécnicos.
3. Desmonte.
4. Levantamiento topográfico y replanteo.
5. Toma de energía eléctrica.
6. Construcción del dique de contención.
7. Construcción de cámaras de registro (de entrada y salida).
8. Construcción de casetas de bombeo.
9. Impermeabilización del dique (fosa o embalse) de contención.
10. Ensamblado del sistema de drenaje o colección.
11. Llenado de gravas y/o arena.
12. Ensamblado del sistema de aplicación.

Los pasos mencionados anteriormente, serán descritos a continuación, ya sea el caso para la construcción de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal como para vertical.

Reconocimiento del terreno

Antes de comenzar con el trabajo de gabinete para el diseño en sí, es necesario realizar el reconocimiento y evaluación del terreno. Dicha visita al campo es de suma importancia y necesaria para poder conocer las características propias del terreno y adecuar el diseño a las condiciones reales del lugar en el cual se emplazará la obra. Aspectos sencillos como la pendiente, la disponibilidad del terreno, el acceso para maquinaria, el uso del suelo, y otros más, serán definitivos para adecuar el diseño y garantizar el éxito de su implementación.

Estudios geotécnicos

Es importante realizar estudios geotécnicos, ya que los datos obtenidos inciden directamente en la toma de decisiones.

Algunas de las determinaciones más importantes son: la capacidad de carga de los suelos, el tipo de suelo, la determinación del nivel de la napa freática; también es necesario averiguar si es una zona susceptible a inundaciones, etcétera.

Desmante

Después de ser efectuados los estudios geotécnicos y comprobada la factibilidad de construir los humedales artificiales en los predios destinados a su implementación se prosigue con las labores de desmante, las cuales consisten en realizar la limpieza, desmalezado y extracción de las malezas, arbustos o arboles que dificulten o incidan en el área de emplazamiento de la obra.

Levantamiento topográfico y replanteo

Posteriormente a los trabajos de desmante, es necesario efectuar un levantamiento topográfico para proyectar la obra. Una vez obtenido el plano, se procede a realizar el trazo, que consiste en la propuesta y posterior replanteo sobre el terreno de las estructuras diseñadas y establecidas en los planos.

El replanteo consiste en delimitar y marcar en el terreno las áreas en la cuales se construirán los diferentes componentes necesarios para la implementación del los humedales a construir, como ser cámaras de registro, dique del humedal, ubicación de tuberías de conducción, etcétera.



Figura 18. Levantamiento topográfico.



Figura 19. Replanteo.

Toma de energía eléctrica

Según el diseño y los requerimientos de energía eléctrica para el funcionamiento del humedal a implementar, es necesario determinar la facilidad de acceso a la energía eléctrica requerida.

Esta tarea la realiza la empresa prestadora de este servicio, la cual extiende un informe técnico a la entidad interesada.

Posteriormente se procede con los trámites pertinentes. Es importante mencionar que según nuestra experiencia, recomendamos realizar estos estudios y trámites con anticipación, ya que éstos tienen plazos más o menos largos (alrededor de un mes hasta su instalación).



Figura 20. Instalación eléctrica.

Construcción del dique de contención

Después de delimitar el lugar en el cual se implementara el humedal, se procede a realizar la excavación del dique de contención o fosa que constituirá las paredes del humedal. Es posible que no sea necesaria la excavación, por haberse considerado la construcción a un nivel más elevado respecto al terreno. En ese caso, será necesaria la construcción y/o nivelación de un terraplén, además de las paredes mismas del humedal.

Para fines prácticos y debido a la escasez de mano de obra que se vive en nuestra región, se sugiere realizar estas labores con maquinaria pesada; si bien el alquiler de este tipo de maquinaria tiene un costo elevado, es necesario hacer una evaluación de los tiempos y esfuerzos necesarios para realizar este trabajo manualmente y compararlo con su realización mediante maquinaria.

En lugares llanos es conveniente formar un cordón de seguridad con la tierra proveniente de la excavación con el fin de prevenir inundaciones en temporadas de lluvia.



Figura 21. Dique excavado y dique elevado con muro de contención.

Construcción de cámaras de registro (de entrada y salida)

En lo que se refiere a las cámaras de registro tanto de entrada como de salida, el diseñador del proyecto determinara los materiales a emplearse para la implementación de los mismos.

Por nuestra parte se sugiere que se tome en cuenta los trabajos de operación y mantenimiento que se deben realizar en estas estructuras, para lo cual las mismas deberán ser de dimensiones apropiadas que faciliten los trabajos mencionados anteriormente.

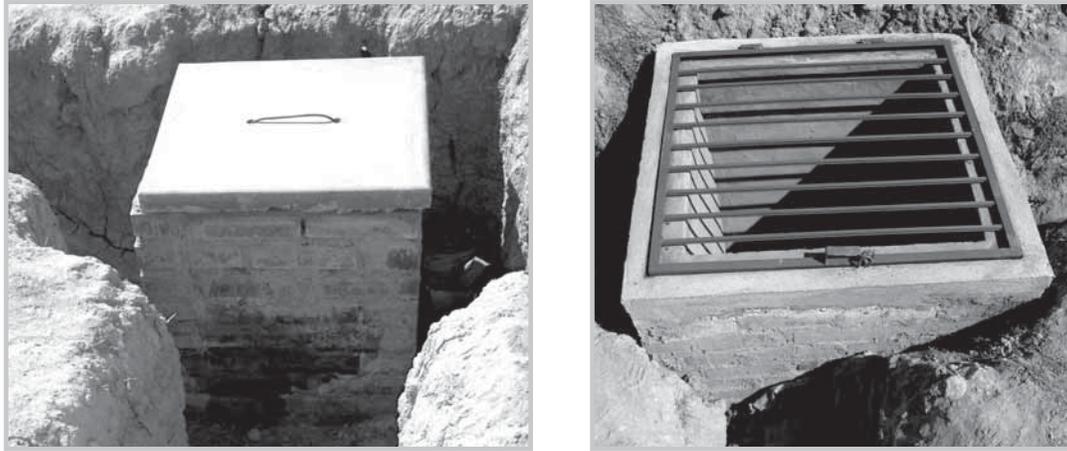


Figura 22. Cámaras de registro y control.

Construcción de casetas de bombeo

En nuestro caso las casetas de bombeo, fueron diseñadas para contener una bomba de 1hp, un temporizador y una toma de energía (enchufe); las dimensiones de las mismas son 1m x 1m x 1m.

Las casetas de bombeo, al ser espaciosas se aprovecharon para ser empleadas como pequeños depósitos de herramientas.

Impermeabilización del dique de contención

Antes de proseguir con la impermeabilización del dique de contención (fosa) del humedal, se debe nivelar la base, dando una pendiente hacia la(s) tubería(s) de drenaje.

La superficie deberá ser lisa y sin elementos que puedan perforar o cortar la geomembrana, nivelada en forma continua y uniforme; sin cambios abruptos de pendiente. La superficie de apoyo debe estar compactada, generalmente se considera una compactación igual ó superior al 90% mediante el procedimiento de Proctor Modificado, de manera tal que evite asentamientos diferenciales que puedan inducir deformaciones importantes a la geomembrana.

Posteriormente se procede al despliegue de la geomembrana, el cual debe ejecutarse en el sentido de máxima pendiente de la superficie.



Figura 23. Caseta de bombeo.

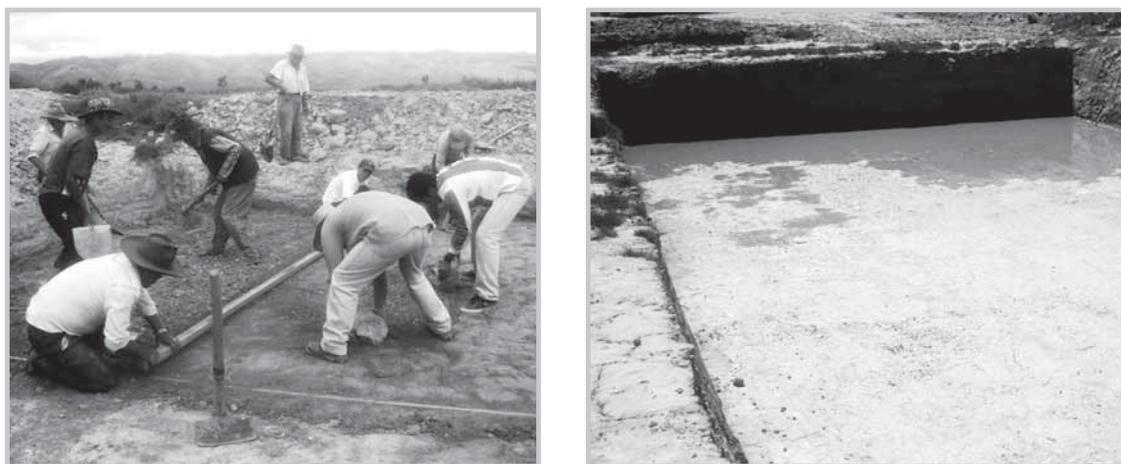


Figura 24. Compactación del fondo.

Para el anclaje del revestimiento de geomembrana en estructuras de tierra, se debe excavar una zanja de anclaje perimetral la cual es rellenada con el mismo material proveniente de la excavación de dicha zanja.



Figura 25. Tendido y anclaje de la geomembrana.

Al ser la superficie de apoyo de la zanja de anclaje uno de los puntos de fijación del revestimiento de geomembrana, esta superficie debe estar nivelada y compactada, además debe estar libre de afloramientos rocosos, grietas, depresiones y cambios abruptos de pendientes.

Es también posible proceder a la impermeabilización mediante otros métodos (revestimiento con cemento, compactación con arcilla, etc), en los cuales es necesaria la máxima prolijidad, pues las fisuras o imperfecciones en la impermeabilización ocasionan una gran variedad de problemas que van desde el mal funcionamiento de los humedales hasta la contaminación de acuíferos.

Ensamblado del sistema de drenaje o recolección

El sistema de drenaje para ambos humedales (vertical y horizontal) es construido con tubería de desagüe con perforaciones de acuerdo a la gradación de grava diseñada para el drenaje del humedal.

En el caso de construir el sistema de drenaje para un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, se requiere de una tubería de 4", perforada, la cual está ubicada en el extremo de salida del humedal

En cambio el sistema de drenaje de los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical, está distribuido a lo largo del lecho del humedal, dispuesto en forma de espina de pescado.

Llenado de gravas y/o arena

Se recomienda colocar una capa de 5 a 10 cm. de arena, antes de comenzar con el llenado de grava del humedal. Esto para proteger a la geomembrana de pinchazos y cortaduras ocasionados por herramientas o durante la colocación de grava.

Una vez acumulado el material gravoso en la zona de construcción, el mismo es dispuesto en capas en toda la superficie del humedal, hasta llenar la cantidad de grava según el diseño.

Ensamblado del sistema de aplicación

El sistema de aplicación de agua residual a los humedales, al igual que el sistema de drenaje consiste en unas tuberías cribadas por medio de las cuales se aplica el agua residual a los humedales.

Una vez armado el sistema de aplicación es posible proceder a la plantación según la especie escogida. Esto debido a que en ese momento se puede garantizar el suministro de agua, necesario para la adaptación y sobrevivencia de las plantas.



Figura 26. Sistema de drenaje humedal horizontal.



Figura 27. Sistema de drenaje humedal vertical.



Figura 28. Detalle de sistemas de aplicación de humedal horizontal y dos verticales.

Monitoreo y muestreo de humedales artificiales

Se entiende por monitoreo a la medición y observaciones continuas y estandarizadas del agua residual (MDSMA, 1997). En el caso de las plantas de tratamiento de aguas residuales, sirve para evaluar su funcionamiento. Esta evaluación permite detectar posibles anomalías y/o verificar el cumplimiento de los objetivos propuestos en cuanto a la calidad de agua. Así, las principales herramientas para realizar un plan de monitoreo son el muestreo y análisis de las aguas y la medición de caudales, además de un registro donde se incluyan todos los resultados obtenidos.

Son varias las actividades a tomar en cuenta para definir un programa de muestreo adecuado a cada caso. Según MDSMA (1997), las etapas típicas para la implementación de uno de estos programas incluyen la definición de i) la planificación y ubicación de los puntos de muestreo, ii) de la metodología de recolección de las muestras y iii) de los análisis a realizarse en campo y en laboratorio.

A continuación se desarrollarán las tres etapas mencionadas, para su aplicación en el monitoreo de rutina en plantas de tratamiento que incluyan lagunas y/o humedales artificiales.

Planificación y ubicación de los puntos de muestreo

Para la definición de esta etapa es necesario tener claro el objetivo del muestreo. También se debe tomar en cuenta la disponibilidad económica, dados los costos de los diferentes parámetros a determinarse. Como ya fue mencionado, para el presente caso se asumirá que el objetivo es realizar un monitoreo de rutina en plantas de tratamiento de aguas residuales que incluyan tecnologías naturales.

Planificación del muestreo a largo plazo

El funcionamiento de sistemas naturales de tratamiento (i.e. lagunas y humedales artificiales) presenta algunas particularidades que tienen influencia en la frecuencia de los muestreos.

Ambos sistemas se basan en el uso de componentes naturales para la depuración. En efecto, su potencial depurador es resultado de la interacción entre agua, suelo, plantas, microorganismos y atmósfera (Seoanez, 1999). Sin embargo, como cualquier sistema natural, están condicionados por las variaciones climatológicas (temperatura, humedad, viento, etcétera) que se producen en las diferentes estaciones. Es decir que su capacidad depuradora puede variar según la magnitud de las variaciones estacionales.

Por la misma razón, su puesta en marcha requiere periodos largos de tiempo, que oscilan desde algunos meses hasta un año (Kadleck *et al*, 2000). Así, tardan algunos años para alcanzar su máxima capacidad de depuración (Robusté, 2004), puesto que está asociada con la madurez biológica de las plantas y los microorganismos de la biopelícula (Ascuntar *et al.*, 2007).

Como el agua residual es retenida por un tiempo largo al interior de los humedales o lagunas (entre uno y ocho días), éstos sistemas son bastante resistentes a grandes incrementos de contaminantes en el agua residual, siempre que duren poco tiempo (Peña *et al*, 2003).

De las consideraciones expuestas previamente, es posible inferir algunas directrices para definir las frecuencias de muestreo de humedales y lagunas.

- Es necesario realizar por lo menos un muestreo durante cada estación del año, para registrar y controlar la forma en que afecta a su funcionamiento.
- Los muestreos deben realizarse durante la mayor cantidad posible de años, desde el inicio de su operación. La madurez de los sistemas se refleja en una capacidad depuradora más o menos constante, su disminución indica el inicio de algún problema y debe ser evaluado.
- Si se sospecha de un incremento muy grande y por largo tiempo, en algún parámetro del agua residual, es necesario programar muestreos adicionales para controlar su efecto sobre el funcionamiento de lagunas y humedales.

Selección de los parámetros a analizar

La selección de parámetros a analizar depende fundamentalmente del destino final de las aguas tratadas. En nuestro país, las dos opciones más comunes para estas aguas son el riego y el vertido a un cauce natural. En definitiva, los parámetros a analizar dependerán de las exigencias de la normativa legal para su uso.

Según Camacho (2005), la legislación nacional no tiene una figura clara respecto al reuso de agua con fines de riego, aunque sí contempla la clasificación de cuerpos de agua para su uso. Esta clasificación incluye numerosos parámetros a determinar.

Sin embargo, ante el costo de la determinación de dichos parámetros, es posible escoger algunos de ellos de forma que permitan el monitoreo a un precio razonable, pero sin omitir los imprescindibles. El criterio más importante para seleccionar los parámetros es el origen de las aguas residuales. Por ejemplo, si provienen exclusivamente de usos domésticos no será necesario realizar análisis de metales pesados. La situación cambia si se realizan vertidos de industrias en el alcantarillado; de ser así, será necesario determinar el tipo de vertidos que realizan las industrias y escoger nuevos parámetros para realizar su control.

El presente texto se centra en plantas de tratamiento de aguas residuales que tratan aguas residuales de uso doméstico, por tanto los parámetros sugeridos para el monitoreo sólo son aplicables en dicha situación. Si el destino final del agua residual es el vertido a un cauce natural, los parámetros mínimos a ser analizados son el pH, los sólidos totales, los sólidos suspendidos, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno, el nitrógeno como amonio y los coliformes termotolerantes.

Si el destino final fuese el agua para riego, teniendo en cuenta las características de las zonas semiáridas del país, es necesario añadir a los anteriores parámetros algunos que permitan la evaluación del riesgo de salinización de los suelos. Así, los parámetros mínimos a determinar son la conductividad eléctrica, el sodio y los cloruros (Vargas, 2005). La interpretación cabal de estos parámetros para evaluar el riesgo de salinización de los

suelos se basa en relaciones más o menos complejas entre dichos parámetros. Sin embargo, y considerando la finalidad del documento, se considerará la interpretación más sencilla, expuesta en el cuadro 16. La interpretación de los resultados para los demás parámetros será explicada más adelante.

Cuadro 16. Valores referenciales de evaluación de agua para riego.

Parámetro	Unidad	Interpretación según su uso para riego		
		Sin problema	Condicional	No recomendable
Conductividad eléctrica	dSm	< 0,75	0,75 – 3,00	> 3,0
Sodio	Meq/l	< 3,00	3,00 – 9,00	> 9,0
Cloruros	Meq/l	< 4,00	4,00 – 10,00	> 10,00

Fuente: Vargas (2005)

Es necesario recalcar que los indicados constituyen parámetros mínimos, y sólo son aplicables para situaciones donde el agua residual provenga exclusivamente de usos domésticos. Además, se deben determinar la mayor cantidad posible de parámetros aplicables según las normas legales.

Localización de los puntos de muestreo

Tapias (2008) indica que las principales consideraciones para definir la localización de los puntos de muestreo son:

- la posible heterogeneidad espacial
- la accesibilidad
- la posibilidad de medición de caudales

Al tratarse las plantas de tratamiento de aguas residuales de instalaciones expresamente construidas, es improbable encontrar una gran heterogeneidad espacial o puntos inaccesibles para el muestreo. Es más común la dificultad en la medición de caudales entre los distintos tratamientos, ya sea por falta de previsión o por un deficiente mantenimiento.

De todas formas, la localización de los puntos de muestreo depende también del objetivo del muestreo.

Para una mejor comprensión de este apartado, considérese la planta de tratamiento de aguas residuales esquematizada en el siguiente esquema

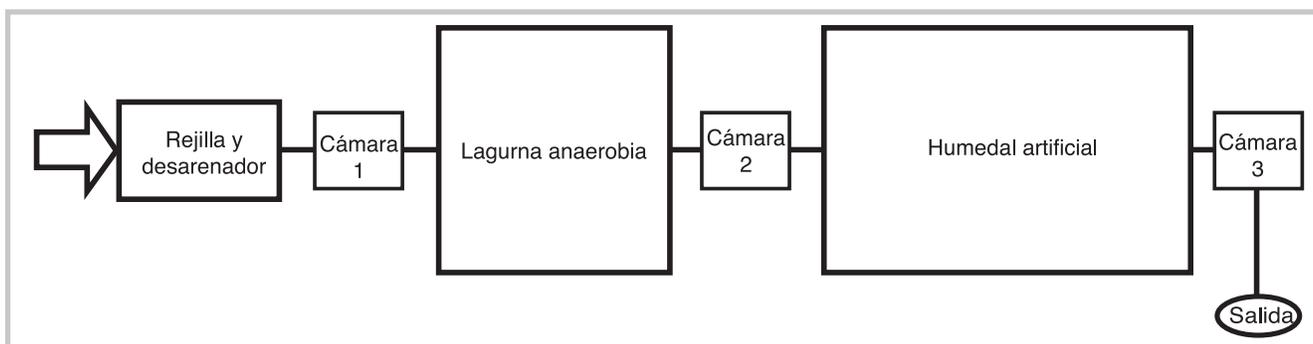


Figura 29. Esquema de una planta de tratamiento de aguas residuales y sus partes

Tomando como ejemplo la figura 29, y suponiendo que el objetivo del muestreo es evaluar el funcionamiento de la laguna anaerobia, entonces los puntos de muestreo serían la cámara de inspección 1 y la cámara de inspección 2. Así se obtendrían los datos necesarios para calcular la eficiencia de remoción de contaminantes sólo de la laguna.

Si, en cambio, el objetivo fuera saber si el agua a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales cumple las normas legales para su vertido, bastará recoger las muestras del punto de salida. Un caso poco común, por ser más propio de trabajos de investigación avanzada, es el muestreo en diferentes puntos de una laguna, para obtener datos detallados de su funcionamiento. En dicho caso, y de ser necesario, se recurrirá al uso de una embarcación para la toma de muestras.

Metodología de recolección de muestras

El objetivo de cualquier toma de muestras es recoger una porción del material que se desea analizar, suficientemente pequeña para ser transportada adecuadamente y manejada en laboratorio mientras todavía represente fielmente el material muestreado. Ello implica que las proporciones relativas y las concentraciones de cada componente de la muestra deben ser las mismas que en el material original, y que la muestra debe ser manipulada de forma que no se produzcan cambios significativos en su composición hasta el análisis (Andreu y Camacho, 2002).

Tipos de muestreo

Son varios los criterios que se toman en cuenta para optar por un tipo de muestreo. Existen tres tipos básicos:

1. muestra simple
2. muestra compuesta
3. muestra integrada

Sin embargo, para los propósitos del presente texto, bastará desarrollar dos de ellos junto a los criterios más afines al monitoreo de plantas de tratamiento de aguas residuales, mencionando que la obtención de muestras integradas es un proceso bastante complejo, que requiere mano de obra entrenada y se usa para aplicaciones que rara vez son de interés para lagunas y humedales artificiales.

Las **muestras simples** o puntuales, representan un punto de muestreo en un momento determinado y se toman para su análisis individual. Es adecuada para representar cuerpos de agua con una composición estable en el tiempo, y para cuando se quiera representar un pico máximo o mínimo de la composición o de un indicador de calidad de agua. Un caso típico, como forma de aclarar este último punto, es el muestreo de organismos patógenos en lagunas: la mayor actividad de microorganismos se registra a mediodía, por tanto, para representar correctamente el riesgo microbiológico de esas aguas, basta una muestra puntual en ese momento.

Las **muestras compuestas** resultan de la mezcla y homogeneización de muestras puntuales recogidas en un mismo punto a lo largo de un periodo de tiempo. Se utilizan para evaluar la calidad promedio de aguas cuya composición varía en el tiempo. Es decir que se reduce el número de muestras a analizar, aunque también la información obtenida de las mismas (MDSMA, 1997).

El procedimiento común para la obtención de muestras compuestas es recoger las muestras puntuales separadas por un intervalo fijo de tiempo. Al final del día, se prepara la mezcla

para ser analizada. El intervalo se define teniendo en cuenta que lo ideal es lograr el mayor número posible de muestras, aunque esta opción también debe tomar en cuenta los aspectos logísticos y actividades a realizar entre muestreos. MDSMA (1997) recomienda que las muestras compuestas lo sean de por lo menos ocho muestras. La contribución de cada muestra a la mezcla debe ser proporcional al caudal registrado al momento de su recolección. Para una mejor comprensión se explicará el ejemplo mostrado en el cuadro 17.

Cuadro 17. Ejemplo de cálculo de alícuotas para muestra compuesta

Hora	Caudal registrado (l/s)	Composición porcentual	Volumen para muestra compuesta (l)
08:00	9,1	16,55	0,41
10:00	6,8	12,36	0,31
12:00	7,6	13,82	0,35
14:00	12,6	22,91	0,57
16:00	10,5	19,09	0,48
18:00	8,4	15,27	0,38
Total acumulado	55	100	2,5

Sean la hora y el caudal los datos registrados durante la toma de muestras puntuales para composición, durante un día de muestreo a la entrada de una PTAR. El primer paso es sumar los caudales para obtener el total acumulado, que en este caso es 55. A continuación, se calcula el valor porcentual de cada caudal registrado respecto del total acumulado, y se anota en la columna de composición porcentual. Finalmente, suponiendo que el laboratorio requiere de un volumen de 2,5 litros para realizar los diferentes análisis, en base a la composición porcentual se calcula el volumen con el que cada muestra puntual contribuirá para obtener los 2,5 litros de muestra compuesta.

Es importante mencionar que las muestras deben ser guardadas hasta el momento de la composición en una conservadora protegida del sol o, de ser posible, en un refrigerador.

Recolección de agua residual

En el proceso de recolección de agua residual se deben tomar en cuenta dos aspectos importantes: las medidas de seguridad y la técnica de recolección.

Las **medidas de seguridad** se refieren a todas las previsiones y cuidados que deben aplicar las personas encargadas de la recolección para evitar contaminarse o enfermarse. Como norma general, Tapias (2008) indica que todas las partes en contacto con el líquido deben estar totalmente protegidas con material impermeable, y en aquellos casos en que se puedan desprender gases o vapores, los equipos y el personal deben alejarse de su campo de acción lo más lejos que sea posible, o utilizar la protección adecuada (máscaras, barbijos, gafas, etcétera).

Es también muy recomendable contar con un botiquín que contenga elementos de primeros auxilios acordes con los riesgos que implica el muestreo de aguas residuales.

Por **técnica de recolección** se entiende a las prácticas adecuadas de recolección para garantizar que la muestra represente al cuerpo de agua. La mayor parte de estas pueden resumirse en las recomendaciones generales dadas por MDSMA (1997):

- a) El recipiente debe enjuagarse dos veces con la muestra
- b) Evitar tomar agua de la orilla
- c) Tomar la muestra por debajo de la superficie del agua y sin tocar sedimentos
- d) Si existe flujo, tomar la muestra enfrentándolo con la boca del recipiente

Cantidad de muestra

Para el análisis de aguas residuales y efluentes, por lo general es suficiente un volumen final de muestra de 2 a 3 litros. Para determinados parámetros puede ser necesario un mayor volumen de muestra. Para pruebas químicas, bacteriológicas y microscópicas se deben tomar muestras por separado debido a que los métodos de recolección y manejo son diferentes. Siempre se debe recolectar un volumen de muestra suficiente en el recipiente adecuado, de forma que permita hacer las mediciones de acuerdo con los requerimientos de manejo, almacenamiento y preservación (Tapias, 2008).

Procedimiento de etiquetado y registro

Una buena identificación es imprescindible para que el muestreo tenga éxito. El MDSMA (1997) afirma que conviene pegar tarjetas en cada frasco de muestreo con el mínimo de información necesaria, pues el resto deberá incluirse en los registros de campo.

La información mínima a incluirse en las etiquetas es detallada a continuación:

- Número de muestra.
- Fecha.
- Código de la muestra.
- Hora del muestreo.
- Número o identificación del punto de muestreo.
- Código de los parámetros a analizar.

Si es posible, también se deben incluir instrucciones para la correcta conservación de la muestra hasta el análisis.

Es muy conveniente utilizar marcadores indelebles y material apto para resistir las distintas inclemencias y situaciones a las que se exponen recipientes con muestras de agua.

Respecto al registro, se deben registrar, además de los mismos datos de la etiqueta, los siguientes (MDSMA, 1997; Tapias, 2008):

- Muestra puntual o compuesta.
- Intervalo de muestreo y/o volumen correspondiente.
- Sustancias preservantes adicionadas.
- Condiciones de muestreo: normal, turbulencia, colores u olores anormales, etcétera.
- Determinaciones de campo realizadas: pH, temperatura, etcétera.
- Nombre del muestreador y de los responsables del traslado de muestras.
- Datos meteorológicos al momento del muestreo.

- Datos de caudal, incluyendo el método de aforo.
- Origen del agua.
- Aspecto del medio natural.

Conservación y almacenamiento de muestras

Para asegurar que las muestras sean transportadas hasta el laboratorio de forma que no sufra alteraciones significativas, se adoptan algunas medidas de forma general (Tapias, 2008):

- Conservar el agua a 4°C mediante neveras portátiles o conservadoras. El agua en estas condiciones se mantiene alrededor de 36 horas.
- Añadir sustancias que estabilicen la muestra, evitando así la acción de los agentes degradantes.
- Proteger las muestras de la acción directa de la luz; para ello se recomienda utilizar botellas opacas.

Es necesario mencionar que existen algunas determinaciones que deben ser realizadas de forma inmediata al muestreo. Éstas, junto a otras determinaciones y particularidades para su conservación hasta el laboratorio son identificadas en el cuadro 18. Allí se evidencia que la recolección, manipulación de recipientes y conservación de muestras de agua residual varía según el parámetro que vaya a ser analizado.

Cuadro 18. Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras.

Determinación	Recipiente	Vol. mínimo de muestra (ml)	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo
Cloruros	P, V	50	S, C	No requiere	28 días
Conductividad	P, V	500	S, C	Refrigerar	28 días
DBO	P, V	1000	S	Refrigerar	48 horas
DQO	P, V	100	S, C	Análizar lo antes posible, o agregar H ₂ SO ₄ y refrigerar	28 días
Metales en general	P	500	S, C	Agregar HNO ₃	
Nitrógeno amoniacal	P, V	500	S, C	Analizar lo antes posible, o agregar H ₂ SO ₄ y refrigerar	28 días
Nitrato	P, V	100	S, C	Analizar lo antes posible o refrigerar	48 horas
Nitrito	P, V	100	S, C	Analizar lo antes posible o refrigerar	48 horas
Nitrógeno orgánico, Kjeldahl	P, V	500	S, C	Refrigerar; agregar H ₂ SO ₄ y refrigerar	28 días
pH	P, V	50	S	Análisis inmediato	-
Sólidos	P, V	200	S, C	Refrigerar	2 a 7 días
Salinidad	V	240	S	Análisis inmediato	-

P = plástico; V = vidrio; S = simple; C = compuesta

En algunos parámetros requiere atención el material del recipiente. Cada caso es diferente, pero básicamente se debe a la posibilidad de que los materiales, reaccionen ante los compuestos preservantes y/o el agua residual, liberando compuestos que puedan alterar los resultados obtenidos.



5.

Parámetros físicos para la caracterización de aguas residuales

Los parámetros físicos dan una idea aproximada de la calidad del agua residual, del proceso que se realiza y de los posibles problemas existentes en el tratamiento, en una estación depuradora de aguas residuales.

Entre los parámetros físicos medibles, los principales son: la temperatura, los olores, la conductividad eléctrica y la turbidez.

Temperatura

La temperatura del agua residual es mayor que la temperatura de agua para abastecimiento, como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial. Este parámetro es importante en el tratamiento de aguas residuales ya que muchos procesos biológicos dependen de la temperatura.

Asimismo, es determinante para el desarrollo de la actividad bacteriana, cuyo rango óptimo se encuentra entre 25 °C a 35 °C. Cuando la temperatura se acerca a los 50 °C los procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana se detienen; por otro lado, cuando la temperatura es menor a 5 °C la actividad microbiana se inhibe (Crites y Tchobanoglous, 2000). La temperatura se determina en el lugar de muestreo mediante termómetros.

Olor

La determinación del olor es un aspecto muy importante en plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente cuando dichas instalaciones se encuentran cerca de centros poblados.

El olor de un agua residual fresca y bien tratada es inofensivo, razonablemente soportable, similar al del moho. Pero cuando el proceso de degradación de contaminantes se realiza en condiciones anaerobias (en ausencia de oxígeno), existe una amplia gama de olores desagradables que son liberados (San Vicente, 2003).

Para una completa caracterización de un olor, Da Cámara (2003) sugiere cuatro factores independientes: la intensidad, el carácter, la sensación de desagrado y la detectabilidad. Sin embargo, en la actualidad, el único factor considerado en las normativas reguladoras de los malos olores ha sido la detectabilidad. Los olores pueden medirse con métodos sensoriales, mientras que las concentraciones de olores específicos pueden determinarse con métodos instrumentales.

En el cuadro 19 mostramos una lista de los compuestos olorosos característicos en aguas residuales.

Cuadro 19. Compuestos olorosos asociados con aguas residuales.

Compuestos olorosos	Fórmula química	Olor característico
Amoniaco	NH_3	Amoniaco
Crotiomercaptano	$\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH}_2\text{-SH}$	Zorrillo
Dimetilsulfuro	$\text{CH}_3\text{-S-CH}_3$	Vegetales descompuestos
Etilmercaptano	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-SH}$	Repollos descompuestos
Metilmercaptano	CH_3SH	Repollos descompuestos
Sulfuro de Hidrógeno	H_2S	Huevos podridos
Eskatol	$\text{C}_9\text{H}_9\text{NH}$	Material fecal
Tiocresol	$\text{CH}_3\text{-C}_6\text{H}_4\text{-SH}$	Zorrillo, rancio

Fuente: Crites y Tchobanoglous, 2000

El umbral de olor de una muestra de agua natural o residual es determinado por dilución de la muestra con agua libre de olor. Crites y Tchobanoglous (2000) indican que el Número Umbral de Olor (NUO) corresponde a la mayor dilución realizada con agua libre de olor, que produce un olor mínimo, apenas perceptible. Lentech (2004) define el Umbral de Olor como la mínima concentración de una sustancia que puede ser detectada por la mitad de las personas presentes.

El método se realiza por dos o más analistas. Uno hace diluciones y el otro determina las intensidades de olor. Las muestras son analizadas generalmente en orden creciente de concentración del odorante, hasta que el olor es percibido. El analista hace la prueba seleccionando la muestra olorosa entre tres matraces, dos de los cuales contienen agua libre de olor. El olor se mide sin tener en cuenta materia suspendida o materiales inmiscibles en la muestra. Se toma como un hecho la inexistencia de un valor absoluto de olor, y, por tanto, la prueba se usa como comparación únicamente. Se realiza con las muestras de agua a 40 °C (Norma Mexicana AA-083-SCFI. 2005).

Turbidez

Se define a la turbidez de una muestra de agua, como una medida de la pérdida de su transparencia, ocasionada por el material particulado o en suspensión que arrastra la corriente de agua (Cárdenas, 2005). Este material puede consistir en arcillas, limos, algas, etcétera, que se mantienen en suspensión debido a la fuerza de arrastre de la corriente o a su naturaleza coloidal.

Queralt (2003) indica que el material coloidal impide la transmisión de la luz, ya que la absorbe o dispersa. La mayor turbidez está asociada con el tamaño de partículas: a menor tamaño de partículas se tendrá mayor turbidez del agua.

Por esta razón, la medición de la turbidez se realiza por comparación entre la intensidad de la luz dispersa en una muestra y la luz dispersa para una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Para la medición de la luz se utilizan unos instrumentos llamados turbidímetros o nefelómetros; los resultados de las mediciones se expresan en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT). El nefelómetro mide la luz que es dispersada con un ángulo de 90° .

En la figura 30 se muestra el funcionamiento de la medición de la turbidez en un nefelómetro.

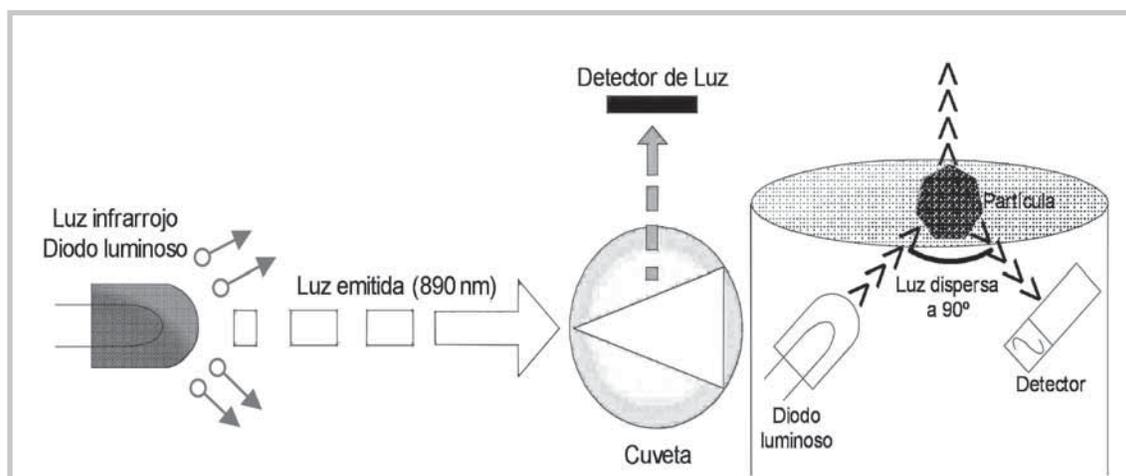


Figura 30. Esquema de la medición de turbidez con nefelómetro.

Una elevada turbidez puede afectar al proceso de depuración de aguas de la siguiente forma:

- Protegiendo a los microorganismos patógenos de los efectos de la desinfección por acción de la luz solar.
- Estimulando la proliferación de bacterias.
- Disminuyendo la capacidad de fotosíntesis de plantas acuáticas y zooplancton (Leandro *et al.*, 2004).

El reglamento en materia de contaminación hídrica no lo considera un parámetro importante para caracterizar las aguas, por ello no existe la concentración máxima permisible en la norma.

Color

El color en aguas residuales (figura 31) es causado por los sólidos en suspensión, material coloidal y sustancias en solución (Crites y Tchobanoglous, 2000). Asimismo, el color puede ser usado para estimar la condición general del agua residual según lo establecido en el cuadro 20.

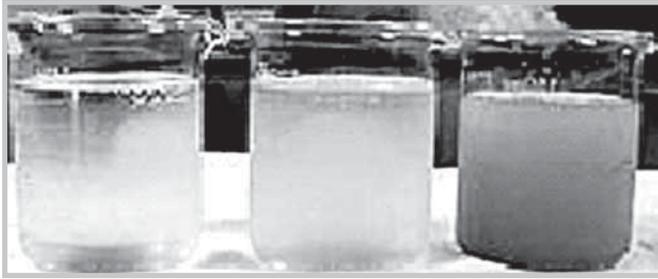


Figura 31. Apariencia de colores en aguas tratadas.

Cuadro 20. Características de aguas residuales con relación al color.

Color	Característica del agua
Café claro	Agua residual lleva aproximadamente 6 horas después de su descarga
Gris claro	Agua que ha sufrido algún grado de descomposición Agua que ha permanecido un tiempo corto en los sistemas de recolección.
Gris oscuro o negro	Aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacterial bajo condiciones anaerobias (sin oxígeno)

Conductividad eléctrica

Se define a la conductividad eléctrica como la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. La corriente eléctrica es transportada por iones en solución, por lo tanto el aumento de la concentración de iones provoca un aumento en la conductividad (Crites y Tchobanoglous, 2000). El valor de la conductividad eléctrica es usado como un parámetro sustituto de la concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT). Con la siguiente ecuación es posible determinar los SDT:

Ecuación 11

$$\text{SDT (mg/L)} \approx \text{CE} * (550-700)$$



Figura 32. Conductivímetro

La conductividad se expresa en micromhos por centímetro ($\mu\text{mho/cm}$) o como decisiemens por metro (dS/m). La determinación *in situ* se realiza mediante un instrumento llamado conductivímetro (ver figura 32), el cual consta de un electrodo y un medidor digital. El electrodo se introduce en el agua a analizar y por lectura directa se determina la conductividad.

El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica no especifica un valor máximo de conductividad para el reuso de aguas residuales.

Sólidos totales

Los sólidos totales son la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a una temperatura entre 103 °C y 105 °C hasta que se evapore (Da Cámara *et al.*, 2003).

Mendonça (2000) clasifica a los sólidos totales en sólidos suspendidos y sólidos filtrables. La fracción de sólidos que quedaría retenida por un filtro de membrana con un tamaño de poro de 1,2 micras, constituye los denominados “sólidos suspendidos”, y el resto los “sólidos disueltos o filtrables” como se puede observar en la figura 33.

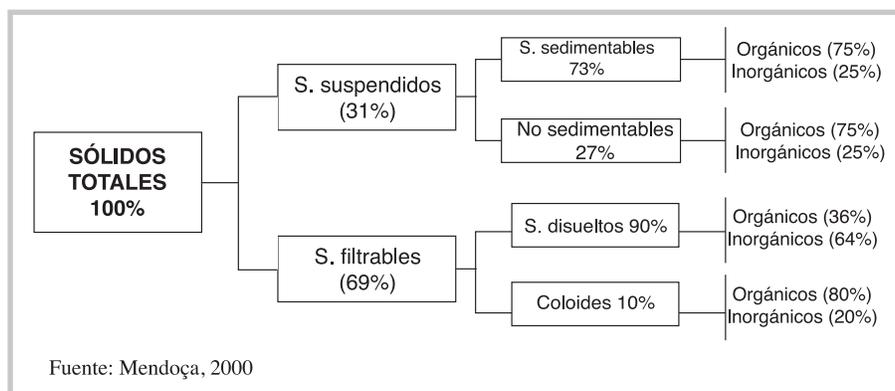


Figura 33. Composición de los sólidos totales en aguas residuales.

Sólidos en suspensión

Las actividades domésticas, pecuarias, agrícolas e industriales, además de algunas ocurrencias naturales, son fuentes potenciales de aporte de sólidos en suspensión a las aguas residuales.

Arce, *et al.* (s.f.), consideran que los efectos de los sólidos suspendidos en los cuerpos receptores varían según el tamaño y naturaleza de los sólidos; pero que desde un punto de vista general, los efectos más notables son: interferencia con la penetración de la luz solar (turbiedad) y el azolve de los cuerpos de agua.

El reglamento en Materia de Contaminación Hídrica indica que los sólidos suspendidos totales en forma diaria no deben ser mayores a 60 mg/l.

Sólidos sedimentables

Se consideran sólidos sedimentables a aquellos sólidos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en un tiempo de 60 min (figura 34).

En lo referente al tratamiento de agua, Da Cámara *et al.* (2003) indican que este parámetro se utiliza para conocer el volumen y la densidad que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual. Su análisis se realiza por volumetría y gravimetría, previa decantación y tamizado. Los tamaños de estos sólidos son mayores de 0,01 mm. Los sólidos sedimentables pueden ser expresados en unidades de ml/l o mg/l.



Figura 34. Cono Imhoff

El reglamento en materia de Contaminación Hídrica define los valores máximos admisibles para la descarga de sólidos sedimentables en cuerpos receptores, como se observa en el cuadro 21.

Cuadro 21. Límites admisibles de sólidos sedimentables.

Parámetro	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
Sólidos sedimentables	<10mg/l.	<30 mg/l 0,1 ml/l	<50mg/l <1 ml/l	100 mg/l <1 ml/l

Sólidos no sedimentables

Sólidos no sedimentables son aquellos sólidos que no sedimentan en recipiente. Permanecen en suspensión y sólo pueden ser retirados por una barrera física, por ejemplo, un filtro (Da Cámara *et al.*, 2003). El tamaño de estos sólidos es mayor a 0,001 mm.

Sólidos filtrables

Según Da Cámara *et al.* (2003), los sólidos filtrables son la fracción de materia sólida que pasa por un filtro de membrana de vidrio con un tamaño de poro de 1,2 micras (figura 35). De la misma forma, estos autores clasifican y definen a los sólidos filtrables, según el diámetro de sus partículas, en sólidos coloidales y sólidos disueltos.

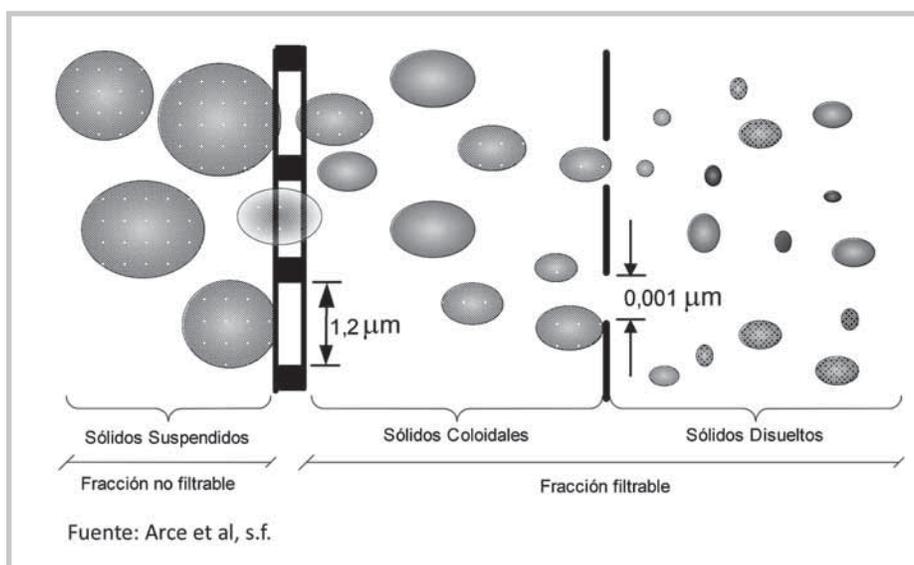


Figura 35. Clasificación de los sólidos en suspensión.

La fracción coloidal está compuesta por las partículas de materia de tamaños entre 0,00001 mm y 0,01 mm. No es posible eliminar la fracción coloidal por sedimentación. Para este fin, normalmente es necesaria la oxidación biológica o la coagulación y floculación complementadas con la sedimentación.

Los sólidos disueltos están compuestos por moléculas orgánicas e inorgánicas, e iones en disolución en el agua. Los sólidos disueltos tienen un tamaño menor a 0,00001 mm. Se relacionan con el grado de mineralización del agua ya que son iones de sales minerales que el agua ha disuelto a su paso. Por ejemplo, un tratamiento prolongado en una piscina con compuestos clorados aumentaría la cantidad de sólidos disueltos y la conductividad en el tiempo.

Para los sólidos disueltos totales, el reglamento en materia de Contaminación Hídrica define los valores máximos admisibles (ver cuadro 22).

Cuadro 22. Límites admisibles de sólidos disueltos.

Parámetro	Unidad	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D	Clase D
Sólidos disueltos	mg/l o ml/l	1000	1000	1500	1500	500

* M= Mensual es el promedio mensual para 30 días de la medición diaria.

Parámetros microbiológicos para la caracterización de aguas residuales

El agua puede transmitir enfermedades entéricas (intestinales) debido al contacto con desechos humanos o animales. La fuente principal de patógenos entéricos son los excrementos y otros desechos eliminados por humanos enfermos y/o animales huéspedes (García, 2004).

Los factores de riesgo que regulan la forma en la cual se transmiten las enfermedades relacionadas a los excrementos humanos, especialmente cuando se utilizan aguas residuales para riego son los siguientes:

- Persistencia del patógeno por periodos prolongados en el medio ambiente.
- Un periodo de latencia o etapa de desarrollo prolongados.
- El huésped presenta poca o ninguna inmunidad.
- Que exista transmisión simultánea por medio de otras vías, como los alimentos, el agua, o deficiente higiene personal (Oakley 2004).

Según García (2004), las variables que afectan la presencia y densidad de los diversos agentes infecciosos en las aguas servidas son:

- Fuentes que contribuyen a las aguas servidas (ganadería, industrias, etcétera).
- Estado general de salud de la población.
- Presencia de portadores de la enfermedad en la población.
- Habilidad de los agentes infecciosos para sobrevivir fuera del huésped bajo diversas condiciones ambientales.

Los microorganismos son especies vivientes de tamaños diminutos. No se consideran como plantas ni como animales; más bien se los califica en un tercer reino llamado protista. En el cuadro 23 se presentan los diferentes microorganismos existentes en las aguas residuales y sus características epidemiológicas más importantes, incluyendo las ambientales.

Cuadro 23. Características epidemiológicas de los patógenos excretados.

Microorganismos	Tamaño (mm)	Persistencia en el Medio Ambiente (20 -30°C)	Resistencia a la desinfección con Cloro	Multiplicación fuera del huésped Humano
Bacterias	0,001 – 0,005	1 – 3 meses	No	No
Protozoos	0,005 – 0,01	< 30 días	Si	No
Virus	0,00001 – 0,0003	Meses	Si	No
Helmintos				Si

* Algunas especies de protozoarios como los huevos de Helmintos pueden llegar a sobrevivir fuera del huésped humano durante varios meses (en las aguas y suelos).

Fuente: Oakley, 2005

En las plantas de tratamiento se cuantifica la eliminación de los constituyentes microbiológicos de las aguas residuales en unidades logarítmicas de base 10, porque se considera que la eliminación de microorganismos esta en función al tiempo de exposición de los microorganismos y a la muerte en un 90 % (Marca y Folch, 2003), como se observa en la ecuación 12.

Ecuación 12

$$C = C_0 * 10^{-(t/T_{90})}$$

Donde:

- C es la concentración final de coliformes.
- C_0 es la concentración inicial de coliformes. Se expresa en: Unidades Formadoras de Colonia (UFC/ml) ó Número Más Probable (NMP/ml).
- t = tiempo de retención en horas
- T_{90} = tiempo necesario para que mueran el 90% de las bacterias

Ejemplo:

Una unidad logarítmica equivale al 90 % de eliminación de microorganismos

Una reducción de 4 unidades logarítmicas en base 10 (\log_{10}) = 99.99 % de la eliminación.

Para su normal desarrollo y reproducción, los microorganismos necesitan fuentes de Carbono, elementos inorgánicos (nutrientes) y energía (Crites y Tchobanoglous 2000).

En el cuadro 24 presentamos la clasificación de los microorganismos según su fuente de nutrientes y energía.

Cuadro 24. Clasificación de microorganismos según fuente de carbono y energía.

Tipo de bacterias	Fuente de carbono y energía para su normal desarrollo
Heterótofos	Carbono orgánico
Autótofos	Dióxido de carbono
Quimioorganótofos	Generan su energía a partir de la oxidación de compuestos orgánicos
Quimiolitótofos	Generan su energía a partir de la oxidación de compuestos orgánicos reducidos como amonio, nitritos y sulfuros
Fotótofos	Utilizan la luz como fuente de energía

Fuente: Cartró, 2003

En este manual se usará la clasificación microbiológica esquematizada en la siguiente figura.

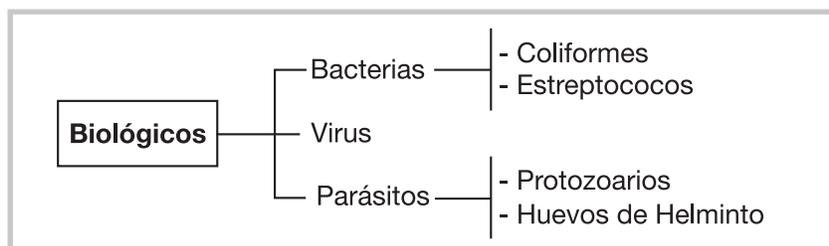


Figura 36. Esquema de clasificación microbiológica en aguas residuales.

Las bacterias

Las bacterias son organismos unicelulares móviles o inmóviles de formas diversas (cocos, bacilos y espirilos), de tamaño y modo de vida diferentes según la especie y el medio (Seoanez, 1995).

Las que se encuentran con mayor frecuencia en el agua son las bacterias entéricas, que colonizan el tracto gastrointestinal del hombre y son eliminadas a través de la materia fecal. Cuando se introducen en el agua, las condiciones ambientales son muy diferentes y por consiguiente su capacidad de reproducirse y de sobrevivir se torna limitada (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2000).

Las bacterias del agua se pueden clasificar según las características del medio que habitan y por la forma de obtener los alimentos (nutrición), como se ve en el cuadro 25.

Cuadro 25. Clasificación de las bacterias.

Criterio de clasificación	Tipo	Características
Por la forma de obtener nutrición	Parásitas	Bacterias que han definido como huésped al hombre o animales, son patógenas y producen enfermedades. Es uno de los factores mas importantes a tener en cuenta en sistemas de tratamiento de aguas, por ejemplo: E. coli, Salmonellas, Vibrio Cholerae, etc.
	Saprófitas	Bacterias que se nutren de los sólidos orgánicos residuales. Ejemplos: nitrobacter, nitrosomas, sulfato –reductoras, etc.
Según las características del medio que habitan	Aerobias	Bacterias que necesitan oxígeno procedente del agua para alimentación y respiración; el agua que habitan (a diferencia de la poblada por otras bacterias) carece de mal olor.
	Anaerobias	Bacterias que consumen el oxígeno procedente de los sólidos orgánicos e inorgánicos.
	Facultativas	Aquellas bacterias aerobias y anaerobias que pueden adaptarse al medio opuesto, es decir, algunas bacterias aerobias pueden desarrollarse y vivir en situaciones sin oxígeno y viceversa.
	Autótrofas	Bacterias que pueden alimentarse a partir de sustancias minerales como dióxido de carbono (CO ₂), Sulfatos (SO ₄ ⁻²), Fosfatos (PO ₄ ⁻³), etc, tomando la energía necesaria para sus procesos a partir de la luz.

Fuente: Seoanez, 1995

Las aguas naturales contaminadas presentan microorganismos patógenos en forma intermitente y en bajas cantidades. Su aislamiento e identificación exigen el análisis de grandes volúmenes de agua, costos elevadísimos y, además, bastante tiempo para el análisis (como mínimo se requieren 6 días) (Mendonça, 2000).

Por estas razones se ha definido un conjunto de características para considerar a una bacteria como indicadora de contaminación fecal:

- Ser constituyente normal de la flora intestinal de individuos sanos.
- Habitar exclusivamente en las heces de los hombres y animales.
- Presentarse en número elevado facilitando su aislamiento e identificación.
- Ser incapaz de reproducirse fuera de los intestinos del hombre y animales.
- Su tiempo de supervivencia debe ser igual o superior al de los patógenos de origen fecal.
- Ser fácil de aislar y cuantificar.
- No debe ser patógena

En el cuadro 26 se muestran las principales bacterias patógenas o parásitas existentes en las aguas residuales y algunas de sus características.

Cuadro 26. Principales bacterias patógenas en aguas residuales.

Bacterias	Fuente	Periodo de incubación	Enfermedad
<i>E. Coli</i>	Hombre	1 a 6 días	Diarreas, vómitos
<i>Salmonellae</i>	Hombre y animales	8 – 48 horas	Diarreas acuosas
<i>Salmonella Typhi</i>	Heces humanas y animales	7 – 28 horas	Fiebre tifoidea
<i>Salmonella paratyphi</i>	Hombre	7 – 28 horas	Fiebre paratifoidea
<i>Otras salmonellas</i>	Hombre		Intoxicación
<i>Shigella spp.</i>	Hombre	1 – 7 días	Disentería bacilar
<i>Vibrio cholerae</i>	Hombre	9 horas a 5 días	Cólera
<i>Otros vibrios</i>	Hombre		Diarreas
<i>Campylobacter spp.</i>	Hombre y animales		Diarreas y septicemias
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Hombre y animales	1 – 5 días	
<i>Leptospira icterohamorhagiae</i>	Ratas		Leptopirosis

Fuente: Mendonça, 2000

Entre todas las bacterias incluidas en la anterior tabla, *E. coli* es considerada actualmente como el mejor indicador de contaminación fecal. También es generalizada la determinación de estreptococos (*Streptococcus*) por ser una de las bacterias más comunes en aguas residuales.

Coliformes

Los coliformes son bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo a los humanos. Cada persona evacúa alrededor de 100.000 a 400.000 millones de coliformes por gramo de heces (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Durante varios años y en la actualidad, se considera a los coliformes fecales como organismos indicadores de bacterias patógenas. Aunque nuevos estudios están demostrando que los coliformes no reflejan la presencia de bacterias patógenas, por lo que se sugiere buscar otros organismos que sean mejores indicadores de la presencia de estos patógenos. Entre los organismos alternativos sugeridos están los estreptococos fecales, enterococos, colifagos y hongos.

Mendonça (2000) clasifica a los coliformes en dos grupos.

- *Coliformes totales*, que son bacterias aerobias y anaerobias facultativas no esporulados. La capacidad de reproducción de estos bacilos, fuera de los intestinos de los animales homeotérmicos (de sangre caliente), es favorecida por las condiciones adecuadas de temperatura, materia orgánica, pH, y humedad. También se pueden reproducir en las biopelículas que se forman en las tuberías de distribución de agua potable.
- *Coliformes fecales*. Constituyen un subgrupo de los coliformes totales, son de tipo bastoncitos de 0.0002-0.0003 mm por 0.002 a 0.003 mm, son aerobios/anaerobios facultativos no esporulados. Se diferencian de los coliformes totales por ser tolerantes a temperaturas elevadas (creciendo a 44,5 °C), lo que les permite estar mejor adaptados a la vida al interior del animal.

Del total de coliformes fecales presentes en las heces humanas, entre el 90% y el 100% corresponden a *Escherichia Coli* (*E. coli*), y que un gramo de excremento humano contiene entre cinco mil millones y cincuenta mil millones de coliformes fecales; es decir que más del 40% del peso húmedo de los excrementos humanos son células bacterianas (San Vicente, 2003).

En la figura 37 se observan distintos coliformes, según la clasificación mencionada.

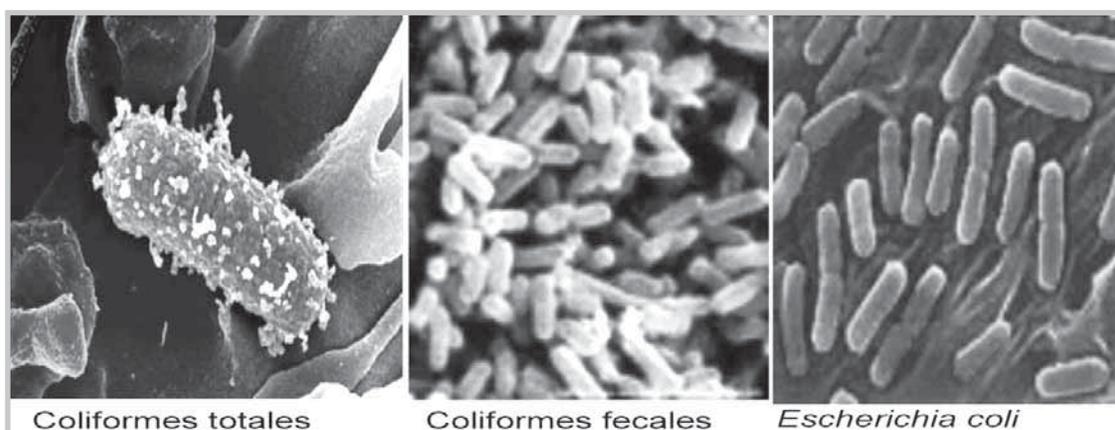


Figura 37. Clasificación de coliformes.

Existen cuatro métodos para el conteo e identificación de bacterias:

- Conteo directo
- Cultivo en placa
- Método de la Membrana Filtrante, que cuantifica los coliformes como: Unidades Formadoras de Colonia (UCF) por cada 100 ml.
- Fermentación en tubos múltiples

El conteo directo se realiza mediante microscopio y con ayuda de una cámara de conteo Petroff – Hauser. Las celdas de conteo están diseñadas para que cada cuadrado de la cámara corresponda a un volumen específico, ya que la profundidad es conocida. El ensayo reporta el resultado como conteo total; la desventaja es que incluye a las bacterias vivas como a las muertas (Crites y Tchobanoglous, 2000).

La figura 38 muestra en forma resumida el procedimiento para el conteo directo de bacterias.

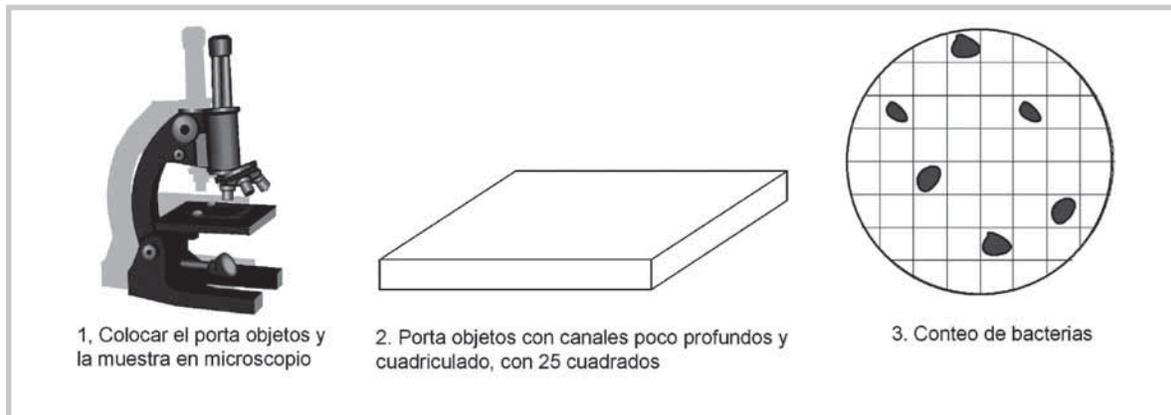


Figura 38. Determinación del número de bacterias por el método conteo directo.

Cultivo en placa. El vertido en placa y el esparcido en placa son métodos que incluyen siembra, identificación y conteo de bacterias. En el método de vertido en placa, la muestra de agua residual a ser analizada se somete a diluciones sucesivas y una pequeña muestra de cada dilución se coloca en una caja para la siembra de bacterias. Las colonias que aparecen después de la incubación son contadas, asumiendo que cada colonia se formó de una sola bacteria; el número total de bacterias se establece de acuerdo con la dilución (Crites y Tchobanoglous, 2000). El resultado se expresa como Número Más Probable por 100 ml (NMP/100 ml).

La figura 39 muestra en forma resumida el procedimiento para la cuantificación de bacterias por el método de cultivo en placa Petri.

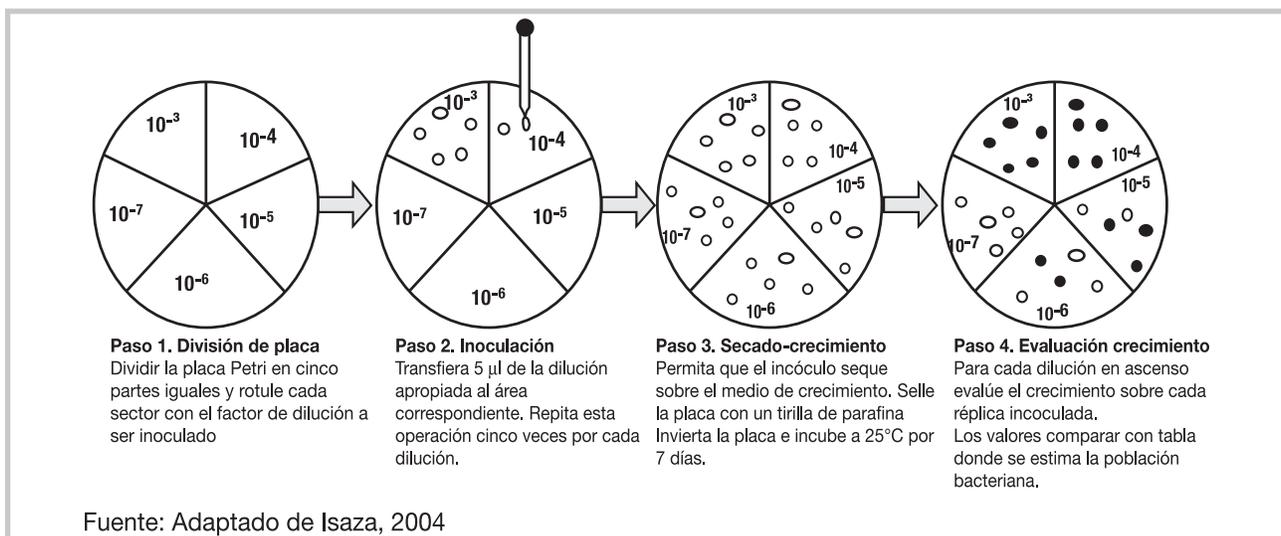


Figura 39. Técnica de Cultivo en placa Petri.

La técnica de la membrana filtrante (MF) es descrita por de Castro y Curtis (2002) de la siguiente manera. Un volumen conocido de muestra se pasa a través de un filtro de placa de membrana que tiene poros de 0,45 micras (0.00045 mm). Las bacterias son retenidas en el filtro, que luego se pone en contacto con agar, el cual contiene los nutrientes necesarios para el crecimiento de las bacterias. Después de la incubación, las bacterias se cuentan y

se calcula la concentración de las mismas en la muestra original de agua. El resultado se expresa en Unidades Formadoras de Colonia por litro ó 100 ml de agua (UCF/100 ml).

Esquemáticamente el método se observa en la figura 40.



Figura 40. Técnica de la membrana filtrante para la determinación de bacterias.

La fermentación en tubos múltiples se basa en el principio de dilución hasta la extinción (Crites y Tchobanoglous, 2000). Las concentraciones determinadas por éste método suelen expresarse como Número Más Probable por 100 ml (NMP/100 ml).

Éste es un método probabilístico cuyo objetivo es diluir el organismo en diferentes soluciones; el proceso se realiza en tres fases: presunción, confirmación y terminación de la prueba (García, 2004).

El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de Bolivia considera como bacterias de contaminación hídrica a los coliformes fecales (en el Reglamento se los denomina colifecales) y tiene los siguientes parámetros máximos admisibles:

Cuadro 27. Límites máximos para la descarga de colifecales en aguas residuales.

Unidad	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D	Diaria
NMP/100 ml	<50 y <5	<1000 y <200	<5000 y <1000	<50000 y <5000	1000

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Planificación, 1999.

Streptococos

Los estreptococos (*Streptococcus*) fecales son bacterias anaeróbicas o aeróbicas facultativas, conocidas como bacterias del ácido láctico, integrantes de la flora normal de los animales de sangre caliente (García, 2004).

Actualmente, se considera que pertenecen al género *enterococos*. Todos los *enterococos* presentan alta tolerancia a condiciones ambientales adversas: altas o bajas temperaturas, deshidratación, salinidad y luz solar.

Para la determinación de estreptococos se tienen dos pruebas: la presuntiva y la confirmativa.

Para la prueba presuntiva se utiliza generalmente el medio de cultivo KAA (Canamicina-Esculina-Azida), que es un caldo de enriquecimiento para *Streptococcus D* de Lancefield. En ese medio de cultivo se inhibe el crecimiento de los otros microorganismos presentes en la muestra, mientras que los *Streptococcus* crecen sin restricción.

En la prueba confirmativa se realiza una siembra en medio de cultivo agar KAA, en varias placas que se incuban a 37 °C y durante 24 a 48 horas. Si al finalizar la prueba apareciesen colonias de color negro se confirma la presencia de estreptococos (ver figura 41).

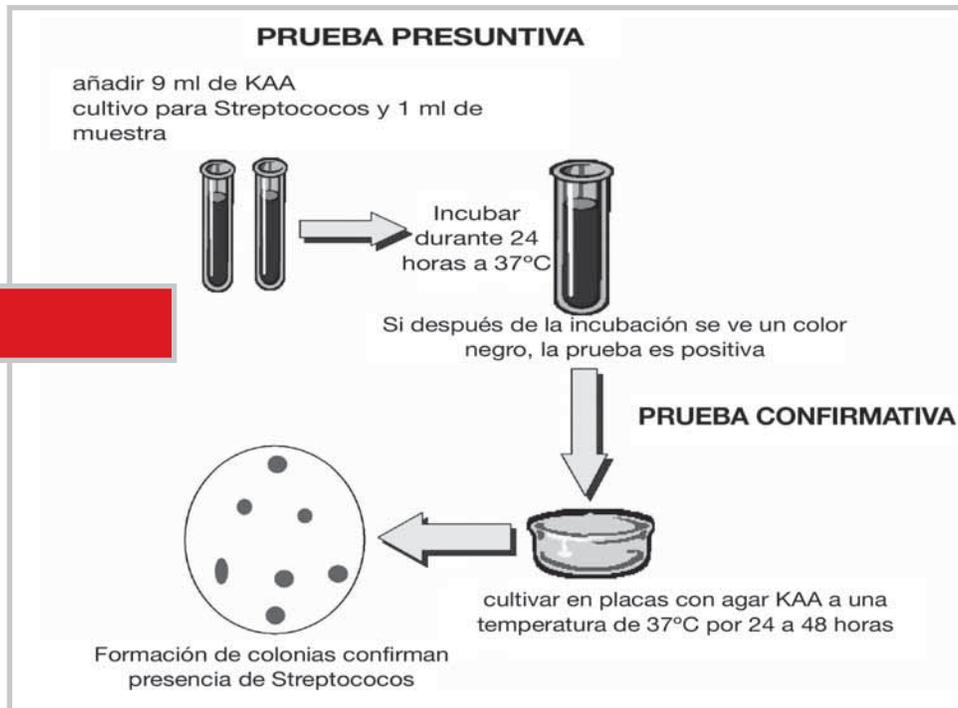


Figura 41. Esquema para la determinación de estreptococos.

Los virus de aguas residuales

En contraste con las bacterias, los virus no se encuentran normalmente en las heces del hombre. Están presentes solamente en el tracto gastrointestinal de individuos que han sido afectados. Acerca de los virus se sabe que, aún en bajas concentraciones, tienen la capacidad de causar infección o enfermedad (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2000).

Las cantidades de virus encontradas en ambientes acuáticos son demasiado variables como para ser considerados buenos indicadores de contaminación acuática.

Hasta la fecha se conocen más de mil tipos de virus diferentes excretados por las heces, los cuales se clasifican en tres grupos: enterovirus, virus de hepatitis y virus de gastroenteritis (cuadro 28).

Cuadro 28. Principales virus existentes en las aguas residuales y algunas de sus características.

Grupo	Virus	Fuente	Periodo de incubación	Enfermedad	Forma de transmisión
1. Enterovirus	Poliovirus	Hombre	3 – 14 días	Poliomielitis, fiebres, meningitis, diarreas, enfermedades respiratorias, Infección de ojos.	Vía oral – fecal y respiratoria
	Echovirus	Hombre	3 – 14 días		
	Coxsackie	Hombre y animales	3 – 14 días		
	Nuevos virus entericos (adenovirus)				
2. Virus hepatitis	Hepatitis A	Hombre	15 – 30 días	No están bien definidas	Vía digestiva – fecal
	- Hepatitis E	Hombre	16 – 65 días	Hepatitis infecciosa	
3. Asociados a gastroenteritis	Rotavirus A y B	Probablemente el hombre	2 – 3 días	Gastroenteritis aguda, diarreas y vómitos	Vía digestiva – fecal
	Astrovirus		1 – 4 días		
	Calicivirus		1 – 3 días		
	Agente Norwalk		1 – 2 días		

Fuente: Mendonça, 2000

Todos los virus mencionados en la tabla anterior pueden infectar el aparato digestivo al beber agua contaminada y posteriormente ser excretados con las heces en concentraciones de uno hasta mil millones de microorganismos por gramo de heces (Abbaszafegan *et al.* en Espinoza *et al.*, 2004).

Debido a su pequeño tamaño y tiempo de vida prolongado los virus pueden desplazarse a través de grandes distancias en el suelo, en las aguas superficiales y subterráneas (Spigares, 2006). A diferencia de las bacterias no se multiplican en el medio ambiente.

La detección de virus es más complicada que la de otros microorganismos debido a la dificultad que entraña su concentración e identificación, ya sea mediante cultivos ó técnicas de biología molecular. La cantidad de virus entéricos en aguas residuales y limpias suele ser tan baja que se hace necesaria la concentración de las mismas. Por esta razón, Spigares (2006) indica que la determinación de virus se debe realizar en dos etapas: concentración de virus en un pequeño volumen y detección de virus en el concentrado.

Para la concentración de virus, el método más utilizado es el de muestras por filtración, y se lo realiza por medio de diversos tipos de filtros. Una vez que los virus son absorbidos al filtro, son eluidos y reconcentrados por una serie de cambios de pH y centrifugación (Espinoza *et al.*, 2004). A partir de estas muestras existen diversos métodos para detectar las partículas virales; entre los principales se encuentran:-

- Método directo, donde las partículas virales se determinan por su tamaño y forma a través de microscopios electrónicos.
- Método directo, mediante microscopía de epifluorescencia, donde las partículas virales se unen a un fluorocromo y emiten señales fluorescentes visible al microscopio.

El método indirecto más usado es por medio de la infección de células cultivadas (generalmente se utilizan bacterias). El mayor problema de este método es que el efecto de infección sobre las células no es observable para todos los virus. Un ejemplo de este método es el de la doble capa de agar, conocido como DAL por su sigla en inglés (ver figura 42).

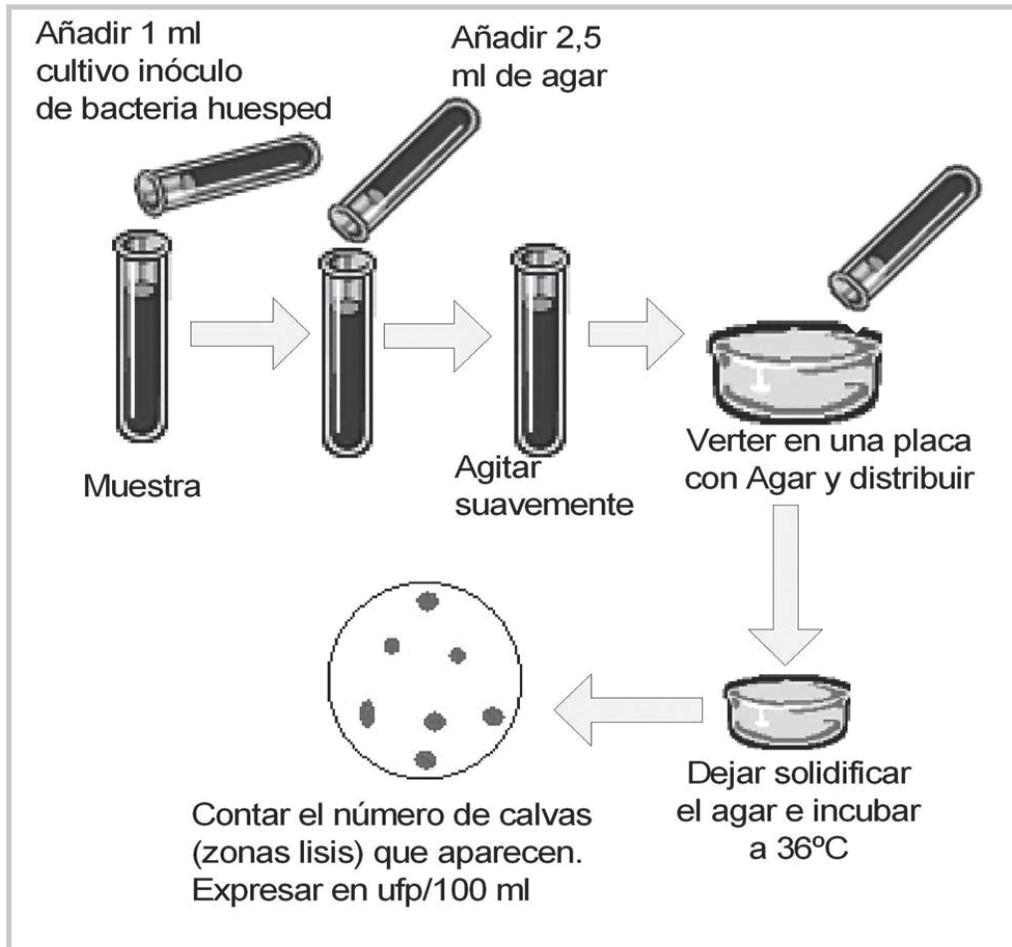


Figura 42. Esquema del método DAL para la determinación de virus.

Existen otros métodos como el test de ácidos nucleicos (ADN y ARN) que, sin embargo, tienen el inconveniente del costo en su aplicación.

La detección y posterior cuantificación de los virus se expresa en:

- Unidades Formadoras de Placa (u.f.p.)
- Dosis Infecciosa para el Cultivo de Tejido (DICT)
- Número Más Probable de Unidades (NMPU)

Spigares (2006) indica que en plantas de tratamiento, la eliminación de virus se expresa como $DICT_{50}$, lo que expresa el logaritmo de la dilución de virus que produce efecto citopático en el 50% de los cultivos. Se ha calculado estadísticamente que $1 DICT_{50} = 0,69$ u.f.p.

La legislación vigente en Bolivia referida a la contaminación hídrica, no menciona nada respecto a los virus.

Parásitos en aguas residuales

Los parásitos microscópicos patógenos para el hombre, se clasifican en dos grupos: los protozoos y los helmintos.

Protozoos

Los protozoarios son organismos unicelulares cuyo ciclo de vida incluye una forma vegetativa y una forma resistente conocida como quiste. El estado de quiste de estos organismos es relativamente resistente a la inactivación por medio de los sistemas de tratamiento convencional de agua residual (Queralt, 2003). Los protozoarios son microorganismos muy comunes en los fangos o lodos que se forman en las plantas de tratamiento.

La importancia de la determinación e identificación de los protozoarios radica en el impacto sobre individuos con deficiencias en su sistema inmunológico, como es el caso de los niños pequeños, personas de edad avanzada, individuos con cáncer o aquellas personas víctimas del SIDA (Crites y Tchobanoglous, 2000).

En el cuadro 29 se identifican los protozoarios más comunes en las aguas residuales.

Cuadro 29. Principales protozoarios patógenos existentes en las aguas residuales.

Protozario	Fuente	Periodo de incubación	Enfermedad	Forma de transmisión
<i>Giardia lamblia</i>	Humanos, animales	5 – 25 días	Giardiasis	
<i>Entamoeba histolytica</i>	Humanos	2 – 4 semana	Amebiasis	Vía digestiva
<i>Balantidium coli</i>	Humanos, animales	Desconocido	Balantidiasis	Vía digestiva
<i>Cryptosporidium spp.</i>	Humanos, animales	1 – 2 semana	Criptosporidiasis	Vía digestiva
<i>Naegleria fowleri</i>	Aguas dulces, suelos	3 – 7 días	Meningoencefalitis, dolor de cabeza, anorexia, fiebre y vómitos	
<i>Acanthamoeba</i>	Agua		Abscesos subcutáneos y conjuntivitis	

Fuente: Mendonça, 2000

Para la cuantificación de protozoarios se sigue una serie de pasos previos: filtración, coagulación y floculación, para recién proceder al conteo directo con la ayuda del microscopio.

Helmintos

Los helmintos son un grupo de organismos que incluye a los nemátodos, tremátodos y cestodos (Mendonça, 2000).

Sus características de vida (alta persistencia en el medio ambiente y capacidad de permanencia en el suelo por largos periodos de tiempo) los clasifican, epidemiológicamente, como patógenos entéricos, potenciales causantes de infección por contacto con agua contaminada; especialmente si el huésped tiene baja respuesta inmune y es expuesto a la mínima dosis infecciosa (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2000).

En la figura 43 se puede observar algunas especies de helmintos mencionadas anteriormente:



Figura 43. Clasificación de los huevos de helmintos.

El método empleado para su determinación, se basa en la diferencia entre las densidades de huevos de helminto y las demás sustancias presentes en las aguas residuales, las que se agregan para permitir la separación. El método comprende los procesos de coagulación, sedimentación, flotación (la densidad de huevos de helminto se encuentra entre 1,05 y 1,18 y la de los líquidos de flotación se sitúa entre 1,1 y 1,4) y la decantación para recuperar los huevos de helminto y efectuar el conteo (NORMA Mexicana NMX-AA-113-SCFI-1999).

El procedimiento esquematizado se puede observar en la figura 44.

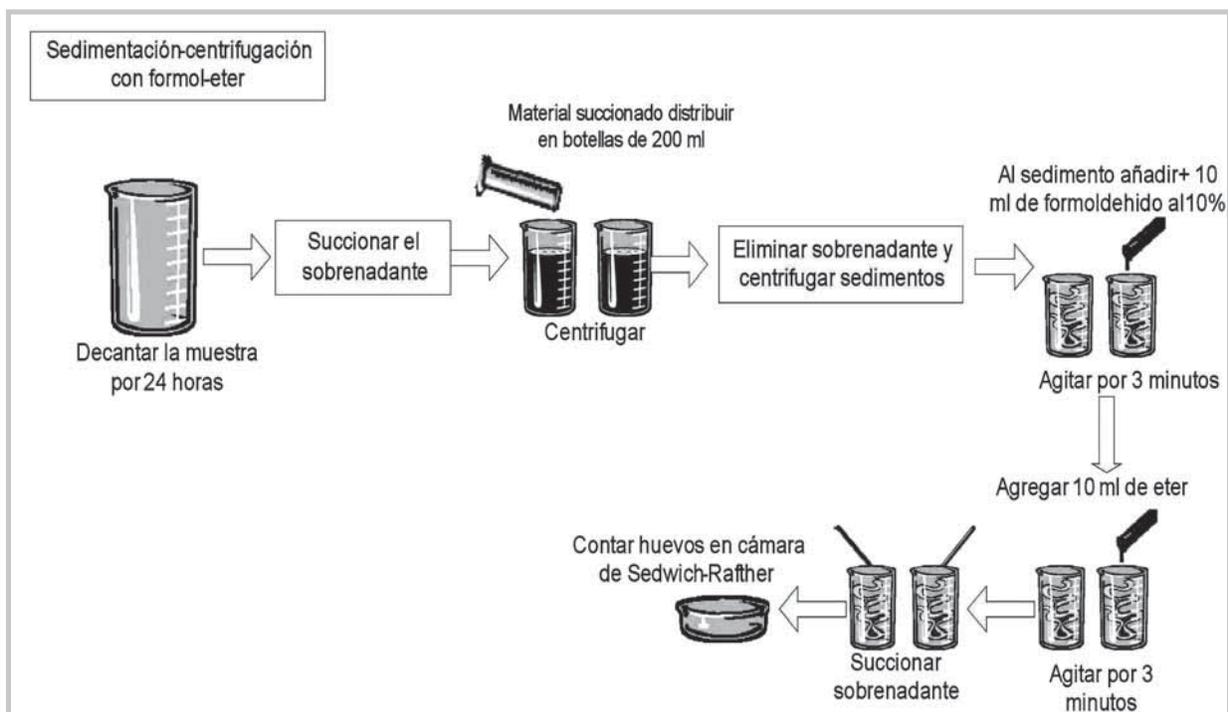


Figura 44. Esquema de la determinación de helmintos.

La infección de los helmintos al hombre se puede dar de las siguientes formas:

- Heces en el suelo o agua y al contacto, penetración por la piel.
- Alimentos contaminados y su posterior ingestión.
- Animales consumen alimentos contaminados, y luego su carne es consumida por humanos; así se transmite la teniasis y la cisticercosis.

Otra forma de transmisión es mediante los mosquitos que habitan en las aguas residuales. Allí los insectos se infectan y, por medio de la picadura, infectan a humanos y animales. Un ejemplo de este tipo de transmisión es la filiarisis, cuyo helminto causante vive y se desarrolla en el interior de los insectos chupadores de sangre que habitan lagunas de oxidación, humedales de flujo libre y otros.

En cuanto a los parásitos, la legislación no especifica si son huevos de helminto o protozoos, o ambos; los engloba como parásitos en forma general, e indica que en cualquiera de sus clases deben estar en cantidades menores a 1 microorganismo por litro.



Parámetros químicos para la caracterización de aguas residuales

Las propiedades químicas del agua tienen gran importancia debido a que interactúan con las del suelo, variando el valor de cada uno de los parámetros de los componentes del agua. Esto obliga a considerar que las modificaciones que se provoquen en el agua residual deben mantener un equilibrio tal que evite, en cualquier forma, que un componente se convierta en factor limitante del crecimiento del sistema natural que queremos aplicar.

Los parámetros químicos más empleados para caracterizar aguas residuales se observan en la figura 45.

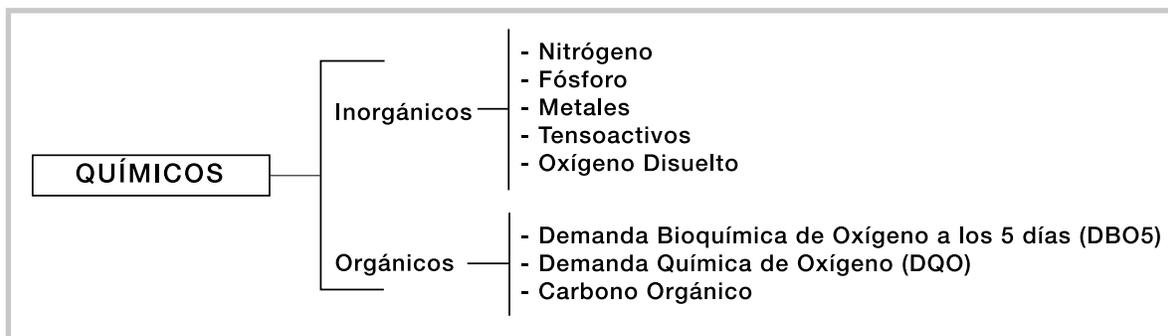


Figura 45. Parámetros químicos a medirse en aguas residuales.

En este apartado veremos en qué consisten los parámetros químicos y su importancia en la caracterización de aguas residuales; es necesario destacar que el pH es una propiedad de gran importancia porque influye sobre todas las demás.

pH

El pH indica la concentración de iones hidrógeno en una disolución. Se utiliza esta notación como medida de la naturaleza ácida o alcalina de una solución acuosa. Muchas propiedades de las sustancias químicas dependen de la concentración del ión hidrógeno en solución (pH).

En las aguas residuales urbanas, el pH se encuentra entre 6,5 y 8,5. Valores elevados (mayores a 9,2) tienen efectos inhibidores del crecimiento de *E. coli*. Cuando los valores están comprendidos entre 5 y 9 (situándose los más favorables entre 6,5 y 8,5) la vida de especies acuáticas es favorecida. En un vertido con pH ácido, se disuelven los metales pesados; a su vez, el pH alcalino ocasiona que los metales precipiten (I Cartró, 2003). Los valores aproximados para clasificar esta propiedad en el agua residual, se muestran en el cuadro 30.

Cuadro 30. Clasificación del pH del agua.

Ácido		Neutro	Alcalino	
Fuerte	Medio		Medio	Fuerte
0 a 4,3	4,3 a 7	7	7 a 8,2	8,2 a 14

El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de Bolivia, establece como valores admisibles de pH a los comprendidos entre 6 a 9, para todas las clasificaciones de uso de aguas.

Compuestos inorgánicos

Los compuestos inorgánicos incluyen nutrientes, metales pesados y gases. Los gases normalmente no son considerados en los análisis de aguas residuales debido a que la toma de muestras y la posterior determinación son procesos complicados y de alto costo.

Los nutrientes son elementos químicos necesarios para el normal desarrollo de la vida. Son requeridos por los organismos como precursores o constituyentes del material celular, por ello son imprescindibles en las estaciones depuradoras de aguas residuales que van a ser sometidas a tratamiento biológico. Reciben esta denominación el carbono, el nitrógeno, el fósforo y otros elementos detallados en el ejemplo proporcionado en el cuadro 31.

Cuadro 31. Composición típica de las células bacteriales.

Elemento	Porcentaje en masa seca	
	Intervalo	Valor medio
Carbono	45—60	50
Oxígeno	16—30	24
Nitrógeno	12—16	12
Hidrógeno	5—8	6
Fósforo	2—5	3
Azufre	0,8—1,5	1
Potasio	0,8—1,5	1
Sodio	0,5—2,0	1
Calcio	0,4—0,7	0,5
Magnesio	0,4—0,7	0,5
Cloro	0,4—0,7	0,5
Hierro	0,1—0,4	0,2
Todos los demás	0,2—0,5	0,3

Fuente: Crites y Tchobanoglous, 2000

Cuando se vierten aguas residuales con una concentración elevada de nutrientes (especialmente de nitrógeno y fósforo), se provocan múltiples problemas en el medio receptor, principalmente la eutrofización (Queralt, 2003).

La determinación de los metales pesados es de suma importancia, ya que muchos de ellos son elementos tóxicos que ocasionan en los individuos trastornos graves o la muerte. El efecto puede ser inmediato o a largo plazo dependiendo del nivel de toxicidad de la sustancia y la facilidad con que sea eliminada del organismo. Muchas de estas sustancias son bioacumulables; es decir que se absorben fácilmente en los tejidos grasos de los animales y no pueden ser eliminados. Posteriormente estos animales son consumidos por

otros animales superiores en la cadena alimenticia, los que a su vez acumulan los metales en sus organismos hasta causarles la muerte.

En forma general, cuando se utiliza el agua residual directamente sobre el terreno, se corren riesgos; por tanto, es necesario un seguimiento exhaustivo del proceso y la evolución tanto del suelo como del medio hídrico.

Los posibles efectos sobre el suelo, el agua subterránea y superficial, del uso de aguas residuales para riego, incluyen:

- La colmatación del lecho de infiltración (suelo) debido a la deposición de las partículas en suspensión del agua residual vertida.
- La presencia de sustancias bioacumulables (B, Cu, Mo, F, Si, Cr, Mn, Fe, Zn, Ni, etcétera) en el agua residual, lo que puede limitar la idoneidad de ésta para el riego. Ansola (2000) resalta que el boro se encuentra en forma de ácido bórico sin disociar en el agua residual; al no tener carga eléctrica, atraviesa los suelos más rápidamente que otros microelementos con el agua de percolación.

El aporte de nutrientes en forma de nitrógeno, fósforo y potasio mejora la aptitud agrícola del suelo sobre el que se vierte el agua residual. Tanto el fósforo como el potasio son poco móviles en el suelo, por tanto quedarán fácilmente retenidos en los primeros estratos. El nitrógeno puede ocasionar problemas, ya que es un elemento muy móvil que experimenta tres transformaciones en el suelo: la mineralización del nitrógeno orgánico a ión amonio, la nitrificación en la que se forma nitrato y por último la desnitrificación (en la que se produce la reducción del nitrato a N_2). Esta última sólo ocurre en condiciones de limitación de oxígeno y presencia de materia orgánica suficiente. Si se completa el último proceso, gran parte del nitrógeno escapa a la atmósfera. En condiciones diferentes de oxigenación y materia orgánica, no se daría o lo haría con menor intensidad, quedando el nitrógeno en forma de nitrato que suele ser arrastrado con el agua que se filtra, pudiendo llegar al agua subterránea.

El agua residual doméstica es muy adecuada para el riego porque posee gran riqueza de nutrientes fácilmente asimilables por las plantas; pudiendo además lavar el exceso de sales.

Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento presente tanto en aguas superficiales como en las aguas residuales. También se encuentra en la atmósfera y en el suelo, cumpliendo un ciclo, como se observa en la figura 46.

En las aguas residuales, a excepción de unos pocos vertidos industriales, el nitrógeno es escaso: fundamentalmente como amonio (por hidrólisis de la urea), proteínas, aminas y escasas cantidades de nitratos.

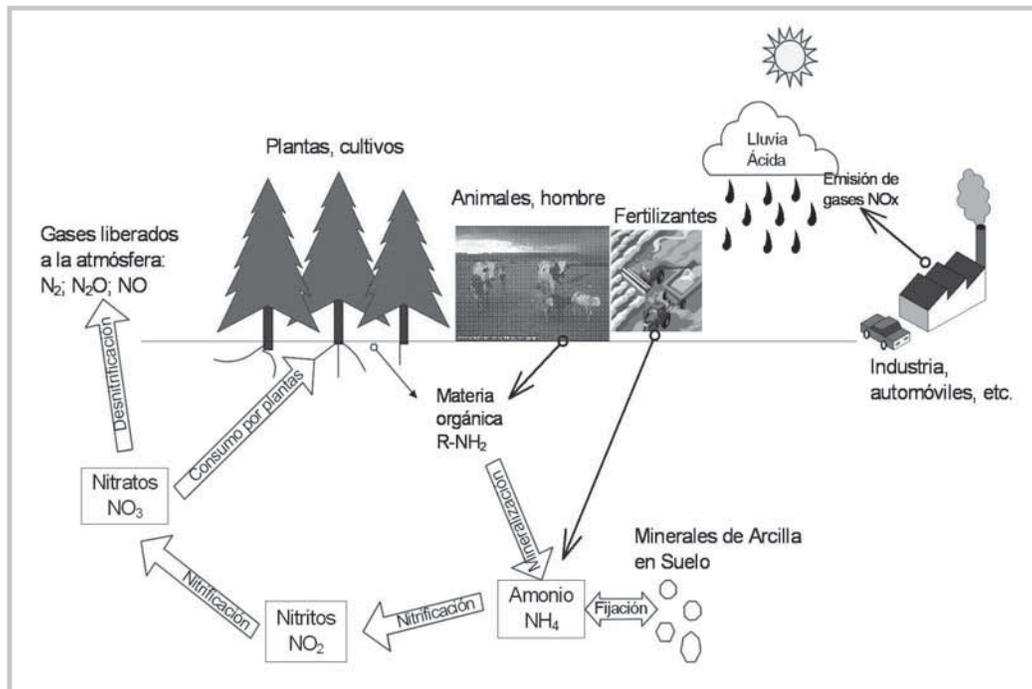


Figura 46. Ciclo del Nitrógeno.

Mendonça (2000) indica que los principales problemas relativos a la contaminación con nitrógeno en las aguas son:

- La disminución de oxígeno disuelto en los cuerpos receptores (ríos y lagos), debido a la oxidación amoniacal.
- El efecto tóxico del amonio en peces y algas.
- El alto contenido de nitratos en el agua potable, afectan especialmente a niños recién nacidos.

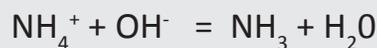
El contenido total de nitrógeno, en los análisis de aguas, está compuesto por nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico.

Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal está presente en aguas superficiales o profundas. Se produce por la desaminación de compuestos que contienen nitrógeno y por la hidrólisis de la urea. También puede producirse por la reducción de los nitratos en condiciones anaerobias. Queralt (2003) afirma que las aguas residuales siempre tienen amoníaco (NH₃⁺), llegando a veces hasta 4 mg/l y aún más.

Para Crites y Tchobanoglous (2000) en las aguas naturales (sin contaminación) y residuales, el nitrógeno amoniacal existe tanto en forma de ión amonio como en forma de amoníaco, dependiendo del pH de la solución.

Ecuación 13



Para valores de pH superiores a 9,3 el equilibrio de la anterior ecuación se desplaza hacia la derecha, predominando el amoníaco (NH₃), mientras que para valores menores a 9,3 existe un predominio de la concentración del ión amonio (NH₄⁺).

En las aguas residuales, el nitrógeno amoniacal puede medirse por colorimetría, al adicionarse el reactivo de Nessler y posteriormente observarse la intensidad del color formado en la solución, como puede observarse en el cuadro 32.

Cuadro 32. Concentración de amonio según método del colorímetro.

Color	Indicador	Concentración amonio
Amarillo	Baja concentración amonio	0,4—5 mg/l
Pardo Rojizo	Alta concentración amonio	10 mg/l

Fuente: Laboratorio de química ambiental, 2004

El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica indica que el nitrógeno como amonio no debe exceder en forma diaria el valor de 4 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ y en forma mensual el valor de 2 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$.

Nitrógeno orgánico

El nitrógeno total determinado en laboratorio está compuesto por el nitrógeno amoniacal más el nitrógeno orgánico, y éste está constituido por las formas de nitrógeno correspondientes al nitrato, nitrito y amonio (Sardiñas y Perez, 2004).

Por su parte, Otoniel (2004) señala que el nitrógeno orgánico se determina por el método de Kjeldahl, es por ello que se le denomina como Nitrógeno Total de Kjeldahl (NTK). El principio de su determinación se basa en convertir el nitrógeno orgánico en ión de amonio, luego se destila y mide por el método de colorímetro y Nessler, al igual que el amoniaco, como se esquematiza en la figura 47

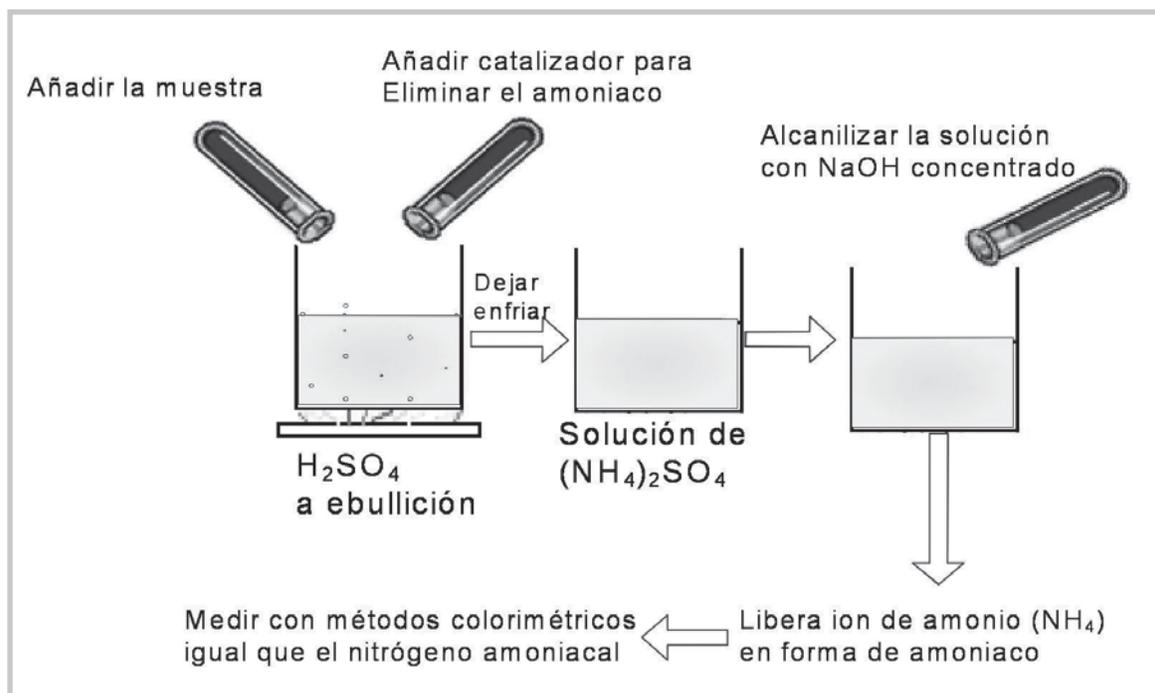
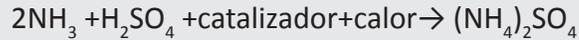


Figura 47. Proceso para la determinación de nitrógeno orgánico.

Las reacciones químicas que se producen durante el proceso de la determinación del nitrógeno orgánico se muestran en las ecuaciones 14 y 15

Ecuación 14.



Ecuación 15



El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica recomienda los valores de Nitrógeno Total de Kjeldahl consignados en el cuadro 33:

Cuadro 33. Límites permisibles para el Nitrógeno Total de Kjeldahl.

Parámetro	Unidad	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
Nitrógeno Total de Kjeldahl (NTK)	mg/l	5	12	12	12

Nitritos

Los nitritos (NO_2^-) están presentes en las aguas, bien por la oxidación del amoníaco o por la reducción de los nitratos. En abastecimientos de agua, la presencia de nitritos indica polución, con la consiguiente presencia de organismos patógenos. Rara vez su concentración excede 1 mg/l en aguas residuales y 0,1 mg/l en aguas superficiales o subterráneas (Crites y Tchobanoglous, 2000).

La importancia de la determinación de los nitritos en aguas residuales radica en que son altamente tóxicos para peces y otras especies acuáticas, aún en pequeñas cantidades.

Su determinación se basa en la reacción de los nitritos con el ácido sulfanílico y el ácido clorhídrico. La reacción se realiza en medio ácido. El resultado de esta reacción es un compuesto de color amarillo-rojizo. La intensidad de la coloración es proporcional a la cantidad de nitritos existente, y midiendo la intensidad de la coloración por espectrofotometría visible se determina la concentración de nitritos (Otoniel, 2004).

El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, establece los límites máximos consignados en el cuadro 34.

Cuadro 34. Límites máximos para la concentración de nitritos.

Parámetro	Unidad	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D	Mensual
Nitritos (NO_2^-) como Nitrógeno	mg/l	<1,0	1,0	1,0	1,0	1

Nitratos

En las aguas residuales, los nitratos se forman por oxidación bacteriana de la materia orgánica, principalmente la eliminada por los animales. En las aguas superficiales y subterráneas, la concentración de nitratos tiende a aumentar como consecuencia del incremento del uso de fertilizantes y del aumento de la población (Colprim, 2003).

Estos compuestos pueden provocar en los niños el Síndrome del Bebé Azul o en términos médicos la metahemoglobinemia, puesto que los nitratos pueden reducirse a nitritos

en el estómago y de esta forma unirse a la hemoglobina ocasionando la reducción en la transferencia de oxígeno a nivel celular; esto se manifiesta por color azulado en la piel (Crites y Tchobanoglous, 2000).

La concentración de nitratos en aguas residuales tratadas puede variar desde 2 a 30 mg/l como nitrógeno, dependiendo del grado de nitrificación y denitrificación del tratamiento (Crites y Tchobanoglous, 2000).

El principio de la determinación de nitratos se basa en reducir los nitratos a nitritos, lo que forma un color púrpura rojizo cuando es en un medio ácido (pH de 2,0 a 2,5). La intensidad de color aumenta con la concentración de nitratos. Luego se cuantifica por espectrofotometría.

El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, establece los límites máximos consignados en el cuadro 35.

Cuadro 35. Límites máximos para la concentración de nitratos.

Parámetro	Unidad	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D	Mensual*
Nitratos (NO ₃) como Nitrógeno	mg/l	20	30	50	50	10

* Promedio mensual para 30 días de la medición diaria.

Fósforo

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, subterráneas y residuales tratadas, como diversos fosfatos, especialmente como ortofosfato PO₄⁻³ (Cartró, 2003).

Según Karl-Slevogt-Straße (2004), en las aguas naturales el fósforo aparece en tres formas: ortofosfato inorgánico disuelto, compuestos orgánicos de fósforo disuelto y fósforo en partículas (ligado a la biomasa o depositado en partículas).

La suma de los tres tipos de fósforo es considerada como el contenido total de fósforo (P_{tot}), que es un parámetro importante a considerar en las operaciones de las plantas de tratamiento de aguas.

Según Crites y Tchobanoglous (2000) la distribución de varias especies de fosfatos es una función estricta del pH, como se puede ver en el cuadro 36.

Cuadro 36. Variación del contenido del fósforo en aguas residuales según pH.

Tipo de fósforos	pH			
	0–2,15	2,15–7,2	7,2–12,35	12,35–14
Fosfatos presentes	H ₃ PO ₄	H ₂ PO ₄ ⁻	HPO ₄ ⁻²	PO ₄ ⁻³
Nombre común	Ácido fosfórico	Fosfato primario	Fosfato secundario	Ortofosfato

Fuente: Crites y Tchobanoglous, 2000

Las formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como: productos de limpieza (detergentes aplicados a lavadoras, lavavajillas, etcétera), fertilizantes, procesos biológicos, entre otros. Según Cartró (2003), sólo una pequeña parte se origina en forma natural de los fosfatos derivados de los propios detritus.

El fósforo como nutriente es esencial para el desarrollo de diversos organismos; por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento, especialmente, de organismos fotosintéticos en grandes cantidades, causando eutrofización de las aguas (Cárdenas, 2005).

Karl-Slevogt-Straße (2004) indica que el fósforo se determina por medio de dos procesos:

- Método con azul de molibdeno.
- Método con vanadato-molibdato (método amarillo).

En ambos casos, la captación de la muestra debe realizarse sin filtración previa para incluir todos los sólidos en el proceso de digestión. Los dos procesos se basan en la medición del ortofosfato mediante fotometría.

La determinación del contenido total de fósforo se divide en dos etapas: en la primera, el fósforo de la muestra se transforma en ortofosfato mediante un proceso de digestión o hidrólisis; en la segunda etapa se realiza la determinación de fósforo propiamente dicho.

La digestión tiene lugar normalmente mediante el calentamiento con peroxodisulfato y ácido sulfúrico, rompiendo las ligaduras orgánicas del fósforo (C-P y/o C-O-P), e hidrolizando los polifosfatos a ortofosfatos (Cárdenas, 2005).

En el primer método, la intensidad del color azul formado es directamente proporcional con la concentración de fosfatos. Sólo es aplicable cuando el contenido de fósforo en las muestras se encuentra entre las concentraciones de 0,01 mg/l a 6,0 mg/l de fósforo (Karl-Slevogt-Straße, 2004).

En el segundo método (con la presencia de vanadio), se forma ácido de color amarillo. La intensidad del color amarillo es directamente proporcional a la concentración de fosfato.

La reglamentación vigente en Bolivia indica que el fosfato total debe medirse como Ortofosfato (PO_4^{-3}), con los valores máximos consignados en el cuadro 37.

Cuadro 37. Límites permisibles de concentración de Fósforo.

Parámetro	Unidad	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
Ortofosfato (PO_4^{-3}) como fósforo	mg/l	0,4	0,5	1,0	1,0

Metales

Los metales existentes en las aguas residuales son originados por la actividad del hombre. Suelen estar presentes en forma de partículas y son rápidamente incorporados a compuestos organo-metálicos o algunas fases minerales. Posteriormente pasan a formar parte de la materia en suspensión (MS) que se transporta en el agua y finalmente de los sedimentos.

Para los organismos que ingieren el sedimento o la materia en suspensión como alimento, estos metales pueden causar graves efectos y además pueden trasladarse hacia los escalones más altos de la cadena alimenticia (San Vicente, 2003).

Los metales tienden a persistir en el medio ambiente indefinidamente, por lo que representan una amenaza más seria que los compuestos orgánicos, que son menos persistentes. Aunque la concentración de un metal pesado en el agua suele ser muy pequeña, el verdadero riesgo está en la acumulación de dichos elementos en suelos y organismos vivos (San Vicente, 2003).

Además, por su gran capacidad de adsorción al lodo, se hace más compleja su posterior digestión y disposición final al ser un residuo común de las estaciones depuradoras de aguas residuales.

La determinación de metales pesados se puede realizar por varios métodos: absorción atómica, plasma coplado por inducción o colorimétricamente. Varias clases de metales son definidas en Standard Methods (1995):

- *Metales disueltos*, son aquellos metales presentes en muestras no acidificadas que pasan a través de un filtro de membrana de 0,45 µm.
- *Metales suspendidos*, son aquellos metales presentes en muestras sin acidificar, que son retenidas en un filtro de membrana de 0,45 µm.
- *Metales totales*, que corresponden a la suma de metales disueltos y metales suspendidos o la concentración de metales determinados en una muestra sin filtrar después de la digestión.
- *Metales extractables en ácido*, son aquellos que permanecen en solución después de que una muestra sin filtrar se trata con un ácido mineral.

Tensoactivos

Los tensoactivos son moléculas orgánicas grandes que se componen de dos grupos: uno insoluble en agua y otro soluble (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Los tensoactivos provienen de la descarga de detergentes domésticos, lavanderías industriales y otras operaciones de limpieza (Mendonça, 2000). Pueden causar la aparición de espumas en el agua de las plantas de tratamiento y/o en la superficie de los cuerpos receptores.

Aceites y grasas.

Las grasas y aceites tienen como característica principal la insolubilidad en el agua. Están siempre en las aguas residuales domésticas, debido al uso de mantequilla y aceites vegetales en cocinas. Pueden incluir también algunos derivados del petróleo debido a contribuciones no permitidas (por ejemplo de estaciones de gasolina, lavaderos de autos, etcétera).

Para el análisis de grasas y aceites, se realiza la extracción de la muestra con triclorotrifluoroetano, puesto que las grasas y aceites son solubles en dicho compuesto (Mendonça, 2000). La determinación se realiza por el análisis de cambio de color de una muestra estándar de azul de metileno.

Cartró (2003), indica que la importancia de la determinación de grasas y aceites radica en que estos compuestos ocasionan la formación de natas y limitan la transferencia de oxígeno de la atmósfera al agua.

El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica establece como valores máximos de concentración de grasas y aceites en aguas residuales, los observados en el cuadro 38.

Cuadro 38. Límites permisibles para descargas de grasas y aceites en aguas.

Parámetro	Unidad	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D	Diario*
Grasas y aceites	mg/l—ml/l	Ausente	Ausente	0,3	1,0	10

* Toma de muestra por un periodo de 24 horas en un día para realizar la medición del parámetro en la descarga líquida.

Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno que contiene el agua se conoce como oxígeno disuelto y proviene de muchas fuentes, siendo la principal el oxígeno absorbido desde la atmósfera. El movimiento de las

olas permite que el agua incremente su absorción. Otra fuente de oxígeno son las plantas acuáticas, incluyendo las algas, puesto que durante la fotosíntesis eliminan dióxido de carbono y lo reemplazan con oxígeno (Mendonça, 2003).

El oxígeno disuelto (OD) es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios así como de otras formas de vida (como ser peces, anfibios, algas, etcétera). A medida que la concentración de OD aumenta, la velocidad de crecimiento microbiano también lo hace. El agua generalmente tiene una concentración de OD de 8 mg/l (Cartró, 2003).

En el cuadro 39, se observan algunos efectos de diferentes concentraciones de oxígeno disuelto en un río.

Cuadro 39. Efectos de diferentes concentraciones de oxígeno disuelto en un río.

Oxígeno disuelto = 7–10 mg/l	Baja	Oxígeno disuelto = 0	Alza en oxígeno disuelto
Población diversificada de peces, mariposas, caracoles, insectos, etc.	OD= 1 mg/l; aumento en bacterias, peces toscos.	Putrefacción, malos olores, aguas de color negro.	Purificación natural.
	OD= 0,5 mg/l; presencia de lombrices de lodos	Muerte de peces y organismos acuáticos	Aumenta la población de peces, etc.

Fuente: Ecoingen, s.f.

La determinación se puede realizar en forma directa por medio de un oxímetro (figura 48). Este equipo tiene un electrodo que posee una membrana permeable al oxígeno; dicho electrodo se introduce al agua en análisis. Este equipo determina la concentración de oxígeno disuelto en forma directa (Cárdenas, 2005).



Figura 48. Oxímetro.

También se puede determinar en laboratorio mediante la adición de diversos reactivos químicos. Para la determinación de OD en laboratorio es importante, al momento del trabajo de campo, fijar la muestra en un medio ácido para que pueda ser transportada y almacenada. Las muestras correctamente fijadas, no sufrirán alteraciones en contacto con el aire atmosférico. Una vez en laboratorio, se titulan las muestras con el fin de determinar la concentración de OD.

En la figura 49 se muestra un esquema del procedimiento de la fijación y posterior titulación de la muestra.

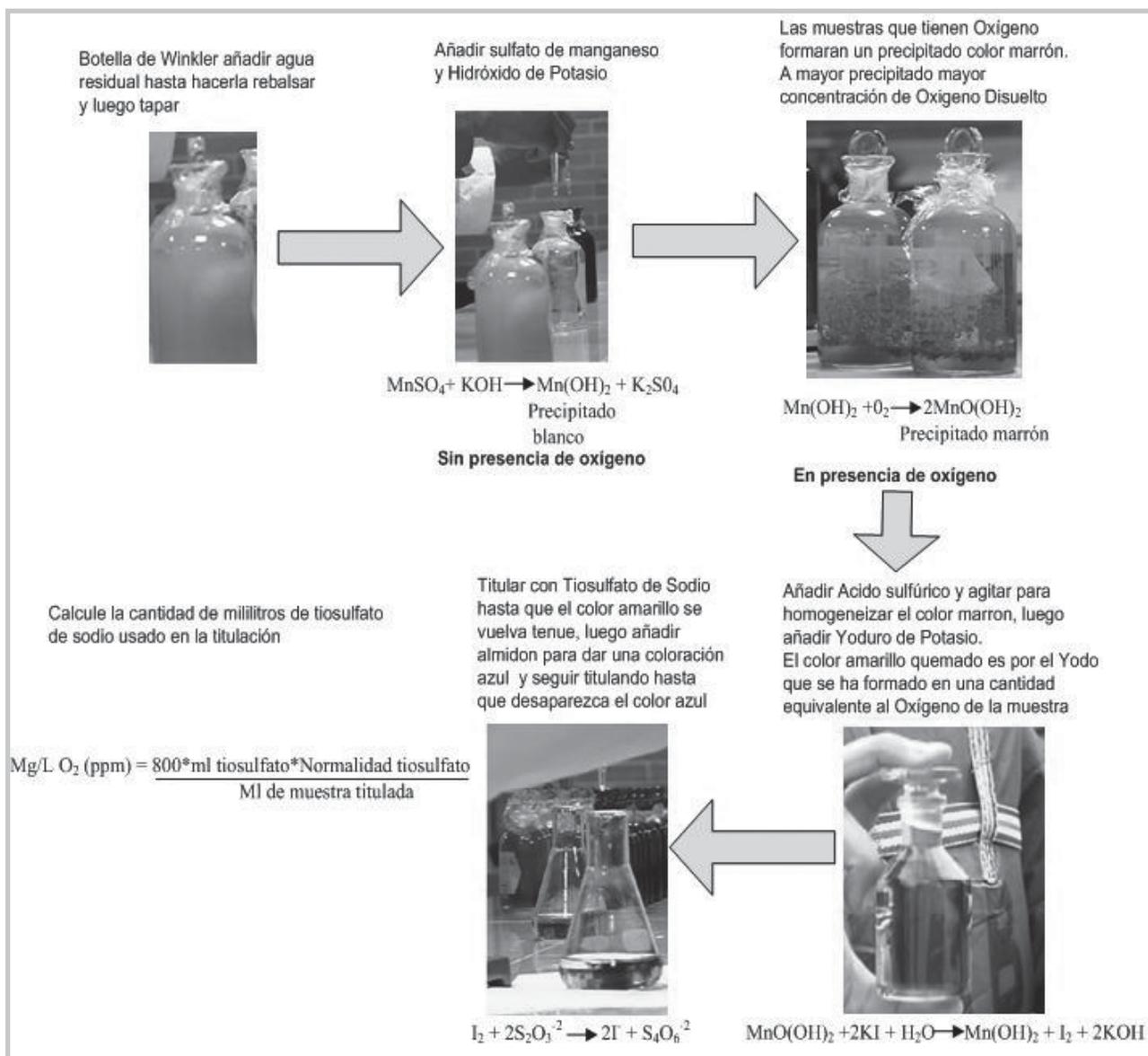


Figura 49. Esquema para determinar el Oxígeno Disuelto.

En cuanto a los valores máximos admisibles para el oxígeno disuelto, el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica establece los límites estipulados en el cuadro 40.

Cuadro 40. Clasificación del agua según su contenido de oxígeno disuelto.

Parámetro	Unidad	Clase A	Clase C	Clase C	Clase D
Oxígeno Disuelto	mg/l	> 80% sat.	>70% sat.	>60% sat.	>50% sat.

Compuestos orgánicos

Materia orgánica son todas aquellas sustancias químicas basadas en carbono, hidrógeno y oxígeno, y muchas veces con nitrógeno, azufre, fósforo, boro y halógenos. No son moléculas orgánicas los carburos, los carbonatos y los óxidos del carbón.

En las aguas residuales la materia orgánica proviene de residuos alimenticios, heces, material vegetal, sales minerales, materiales orgánicos y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos.

Existen tres métodos principales para medir la cantidad de materia orgánica en el agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Carbono Orgánico Total (COT). Todos los métodos se basan en la valoración de la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar diferentes fracciones de la materia orgánica presente en el agua.

Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO_5)

Este parámetro se aplica a las aguas residuales y en menor medida a las aguas superficiales (Queralt, 2003). Es la cantidad de oxígeno consumido (durante 5 días en oscuridad y a una temperatura de 20 °C), para oxidar la materia orgánica presente en el agua por medio de procesos aerobios (biodegradación).

El procedimiento para su determinación es el siguiente. Se coloca una pequeña cantidad de agua residual en una botella de DBO (conocida como botella Whinkler). Se llena totalmente la botella agregando agua saturada con Oxígeno Disuelto y los Nutrientes requeridos (García, 2004). Esta disolución se mide con un oxímetro para ver la concentración de oxígeno disuelto o bien se determina en laboratorio como ya se indicó. Posteriormente se tapa la botella y se incuba a una temperatura de 20 °C durante cinco días. Después de este tiempo se vuelve a medir la concentración de oxígeno disuelto, como se puede observar en la figura 50.



Figura 50. Determinación de DBO_5 en laboratorio.

La DBO_5 de la muestra es la diferencia entre la concentración de oxígeno disuelto al inicio de la prueba y la concentración una vez finalizada la misma, dividido entre el volumen de muestra usada (García, 2004). Un esquema del proceso se muestra en la figura 51. La DBO se expresa en mg/l.

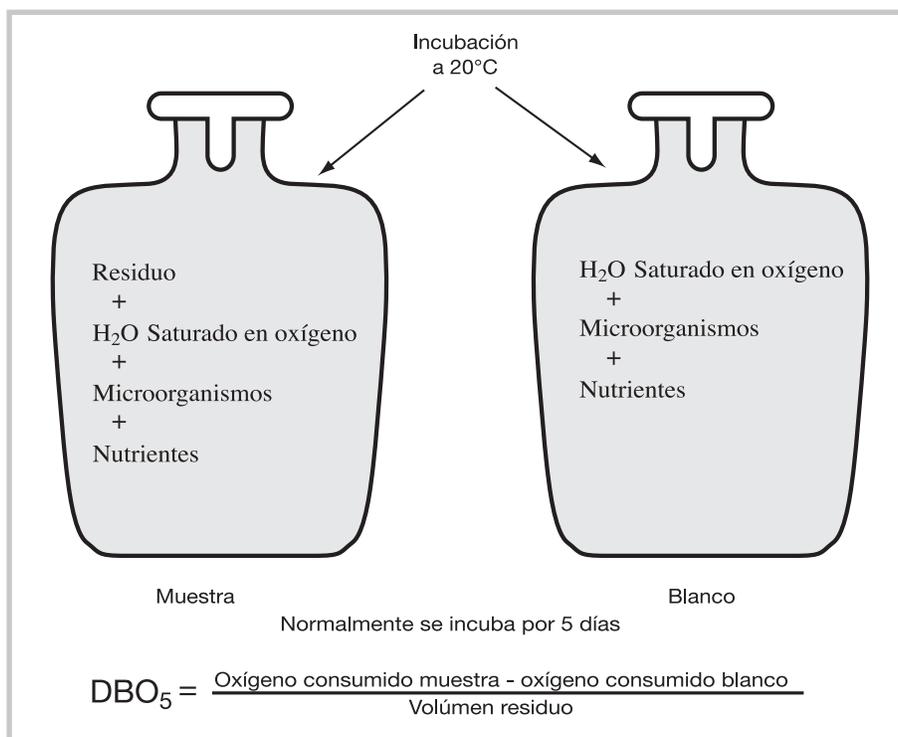


Figura 51. Proceso para determinar la DBO₅.

La DBO₅ en aguas residuales suele variar entre 200 y 400 mg/l (Cartró, 2003). Los valores más elevados normalmente corresponden a poblaciones pequeñas con gran abundancia de agua, riego de calles, sistemas de distribución deficientes que inciden en la red de alcantarillado, presencia industrial, turismo, ganadería, etc.

En cuanto a los valores máximos admisibles del DBO₅, el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica establece los siguientes límites (cuadro 41):

Cuadro 41. Límites máximos permisibles de la concentración de la DBO₅.

Parámetro	Unidad	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D	Diaria
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	<2	<5	<20	<30	80

Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno necesario para descomponer químicamente, la materia orgánica degradable y biodegradable en un periodo de tres horas (Queralt, 2003).

Se trata de un ensayo empleado para medir el contenido de materia orgánica de una muestra de agua residual bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Como agente oxidante se emplea el dicromato de potasio, siendo el acidificante de uso generalizado el ácido sulfúrico; ambas son sustancias fuertemente oxidantes. Bajo tales condiciones se oxida toda la materia orgánica presente en la muestra incluyendo la materia orgánica que los microorganismos no pueden degradar. El análisis de este parámetro se aplica tanto a aguas superficiales como residuales (Otoniel, 2004).

Se debe medir entonces el carbono inorgánico (CI) y por diferencia entre el CT y el CI se obtiene el COT. El carbono inorgánico (CI) se mide inyectando la muestra (agua residual) en una cámara de reacción distinta, que contiene ácido fosfórico (H_3PO_4). Bajo condiciones ácidas todo el CI se convierte en CO_2 , que se mide en el analizador de infrarrojos. En estas condiciones el carbono orgánico no se oxida, por lo que sólo se determina el CI.

En la figura 54, se muestra la reacción en forma resumida para la determinación del carbono orgánico total:

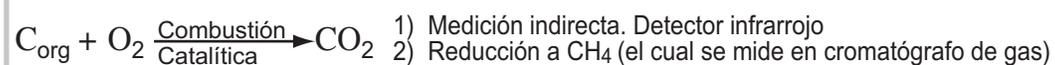


Figura 54. Procesos para determinar el Carbono Orgánico.

Relación DBO, DQO y COT

La relación DQO/DBO₅ muestra qué tan biodegradable es el agua residual. El valor habitual de la relación DQO/DBO₅ oscila entre 1,8 y 2,2 (Cartró, 2003). Valores más altos indicarán la presencia de aguas industriales con productos tóxicos como ser metales pesados, tensoactivos y otros.

La relación DBO₅/DQO en aguas residuales municipales no tratadas oscila entre 0,3 y 0,8; y que la relación DBO/COT para aguas residuales no tratadas varía de 1,2 a 2,0 (ver cuadro 43).

Cuadro 43. Comparación de relaciones DBO₅/DQO y DBO₅/COT.

Tipo de agua residual	DBO ₅ /DQO	DBO ₅ /COT
No tratada	0,3—0,8	1,2—2,0
Después de sedimentación primaria	0,4—0,6	0,8—1,2
Efluente final	0,1—0,3	0,2—0,5

Fuente: Crites y Tchobanoglous, 2000

Bibliografía

Álvarez, J y E. Bécares

2005 “El papel de la vegetación en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales” en Memoria del Encuentro Internacional en Fitodepuración, Lorca.

Andreu, E y A. Camacho, A.

2002 *Recomendaciones para la toma de muestras de agua, biota y sedimentos en humedales Ramsar*, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Arce, A. *et al.*

s.f. *Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua: Fundamentos técnicos para el muestreo y análisis de aguas residuales*, Ed. CG.

Arias, O.

2004 *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial*. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. Tesina, Barcelona.

Ascuntar, D., A. Toro, M. Peña y C. Madera

2007 “Influencia del crecimiento biológico en la hidrodinámica y en la remoción de materia orgánica en un humedal de flujo subsuperficial sin vegetación, para el tratamiento de aguas residuales domésticas en regiones tropicales” en *Seminario Internacional sobre Manejo Integral de Aguas Residuales Domésticas*, Instituto de Investigación y Desarrollo en Agua Potable, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (CINARA), Universidad del Valle, Colombia.

Aycachi, I.

2004 “Botánica general” en www.monografias.com (21 de septiembre de 2006).

Camacho, A.

2005 *Importancia de la gestión y uso actual de las aguas residuales urbanas en la producción agrícola del municipio de Punata, Cochabamba*, Tesis de Maestría, Universidad de Las Palmas y Gran Canaria - Fundación Universitaria Iberoamericana.

Cárdenas, A.

2005 *Calidad del agua*, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Caldas.

Cartró, J.

2003 *Tratamiento de aguas industriales. Depuración biológica de las aguas residuales*, Ed. Fundación Universitaria Iberoamericana –Universidad de Catalunya, Barcelona.

CENTRO REGIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

2007 *Macrófitas*, Gobierno de Mendoza, en www.cricyt.edu.ar (20 de enero de 2008).

- Colprim J.
2003 *Tratamiento de aguas industriales: Modelización de procesos biológicos en la depuración de aguas residuales*, Fundación Universitaria Iberoamericana, Barcelona.
- Cooper, P. *et al.*
1996 *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*, WRc, Swindon.
- Crites, R y G. Tchobanoglous
2000 *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*, Mc. Graw Hill, Santafé de Bogota.
- Da Cámara, L. *et al.*
2003 *Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias*, Ed. M. Gómez, Barcelona.
- De Castro N y M. de Curtis
2002 *Método de la membrana filtrante para el análisis microbiológico del agua*, Ed. Laboratorio de microbiología de alimentos. Universidad de Salamanca, Salamanca.
- Delgadillo, O., M. Andrade, A. Camacho, L. Pérez y R Argote
2008 “Zonas húmedas construidas, una tecnología natural para la depuración de aguas residuales con fines de riego en municipios rurales y periurbanos” ponencia presentada en la “Reunión sudamericana para manejo y sustentabilidad de riego en regiones áridas”, Salvador, Bahia-Brasil, del 21 al 23 de octubre de 2008.
- Durán, A., O. Moscoso, A.M. Romero, E. Villarroel y M. Jeths
2002 *Use of treated wastewater for irrigated agriculture: A case study of Bolivia*, CASA – Centro AGUA – WU, Cochabamba.
- ECOINGEN
s.f. “Agua” en <<http://www.ecoingen.cl>> (15 octubre de 2005).
- EPA (Environmental Protection Agency)
2000 *Humedales de flujo libre superficial* (disco compacto), EPA, Washington D.C.
- Espinoza, A., C. Arias y M. Mazari
2004 “Virus en sistemas acuáticos e implicaciones en la salud pública” en *Hidrobiología*, 14 (2), pp. 166 – 178.
- Fernández, J. *et al.*
2004 *Manual de fitodepuración*, Ayuntamiento de Lorca, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Figueredo, M.
s.f. “Implementación y evaluación de la eficiencia de una planta piloto sistema de Fitodepuración con totora procedentes de cultivo in Vitro para el tratamiento de aguas residuales”, Documento de proyecto, Centro de Investigación en Biotecnología y Recursos Fitogenéticos (CIBREF) - Laboratorio gabinete – informática, Bolivia.
- Folch, M.
s.f. “Fitotecnologías en la depuración de aguas residuales”, presentación Power Point. Universidad de Barcelona, Facultat de Farmacia, Laboratori d’a Edafología, Barcelona.
- García, E.
2004 *Tratamiento de aguas industriales: Análisis microbiológico de aguas residuales*, Fundación Universitaria Iberoamericana. Barcelona.

García, J.

2004 *Tratamiento de aguas industriales: Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno*, Ed. Fundación Universitaria Iberoamericana. Barcelona.

2003 *Tratamiento de aguas industriales: Determinación de carbono total*, Fundación Universitaria Iberoamericana, Barcelona.

García, J., J.M. Bayona y J. Morató

2004 “Depuración con sistemas naturales: humedales construidos” ponencia presentada en el “IV Congrés Ibèric de Gestió i Planificació de l’Aigua”, Tortosa, España.

García, M., E. Bécares y F. Soto

2004 “Are bacterial removal efficiencies enhanced by plants? An experimental study using *Scirpus lacustris*” en Memoria del Congreso de Ingeniería Ambiental, Avignon.

Hazelip, E.

2004 “Depuración natural de aguas” en www.maslibertad.com/huerto/Depuracion.htm (22 de septiembre de 2006).

Isaza, M.

2002 *Tratamiento de aguas industriales: Conteo de bacterias en placas*, Fundación Universitaria Iberoamericana. Barcelona.

Kadleck, R., R. Knight, J. Vymazal, H. Brix, P. Cooper, y R. Haberl

2000 *Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design and operation*, IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing.

Karl-Slevogt-Straße

2004 *Fosfato*, Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GMBH, Alemania.

Kolb, P.

1998. *Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós*, Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur, Universität für Bodenkultur.

Laboratorio de Química Ambiental

2004 *Determinación de N-NTK y N-NH₄. Método por destilación y nesslerización*, Universidad de la Frontera, Temuco.

Laboratorio de Tecnología Educativa

s.f. *Análisis Microbiológico de Aguas*, Departamento de Microbiología y Genética. Universidad de Salamanca, Salamanca.

Lahora Cano, A.

2004 “Los humedales artificiales como tratamiento terciario de bajo coste en la depuración de aguas residuales urbanas” en www.gem.es/MATERIALES/DOCUMENT/DOCUMENT/g01/d01203/d01203.htm

Lara B., J.A.

1999 *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales*, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña -Instituto Catalán de Tecnología, Barcelona.

La Razón

2009 “Sólo el 40% de las aguas servidas son tratadas”, La Paz, 8 de agosto de 2009.

Leandro M. et al.

2004 *Higiene y sanidad ambiental. La turbidez como indicador básico de la calidad de aguas potabilizadoras a partir de fuentes superficiales*, Facultad de Ciencias para la Salud, Universidad Nacional de Entre Ríos, Concepción del Uruguay.

LENTECH

2004 “Agua residual y purificación del aire” en www.lenntech.com/espanol/olor.htm (16 octubre de 2006).

León, G.

1995 *Programa de tratamiento de Aguas Residuales. Aspectos generales y principios básicos de los sistemas de lagunas de estabilización*, CEPIS, Santiago de Cali, Colombia.

Málvarez, A.

1999 *Tópicos sobre humedales subtropicales y templados* (disco compacto), Oficina regional de ciencia y tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe, Montevideo.

Marcay, MS de y M. Folch

2003 *Tratamiento de aguas industriales: Reutilización de aguas residuales*, Fundación Universitaria Iberoamericana. Barcelona.

MDSMA

1997 *Metodologías para el diseño de redes de monitoreo, estadísticas, precisión de las determinaciones analíticas y control de calidad*, Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, Buenos Aires.

Mendonça, S.

2000 *Sistemas de lagunas de estabilización: Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío*, Mc. Graw Hill, Santafé de Bogotá.

Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación

1999 *Ley N° 1333 del Medio Ambiente y su Reglamentación*, El Gráfico, La Paz.

Navas, L.

2001 “Flora de la cuenca de Santiago” en <http://mazinger.sisib.uchile.cl/.../navasl01/cap2/tribu10.html> (19 de septiembre de 2006).

Oakley, S.

2005 *Lagunas de Estabilización en Honduras: Manual, diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad*, Red Regional de Agua y Saneamiento de Centro América, Honduras.

OIA (Oficina Internacional del Agua, UE)

2001 *Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales adaptadas a las pequeñas y medias colectividades* (disco compacto), Oficina de las publicaciones oficiales de las comunidades europeas, Luxemburgo.

Otoniel, A.

2004 *Tratamiento de aguas industriales. Características químicas del agua*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Peña M.

2003 *Lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales*, Universidad del Valle, Instituto CINERA, Cali.

Peña, M., M. Ginneken, C. Madera

2003 “Humedales de flujo subsuperficial: una alternativa natural para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas tropicales” en *Ingeniería y Competitividad*, 5(1):27-35

Queralt, R.

2003 *Tratamiento de aguas industriales: Generalidades*, Fundación Universitaria Iberoamericana, Barcelona.

Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua

2000 *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas*, Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua.

Robusté, J.

2004 “Humedales construidos en explotación, experiencia en Catalunya” en J. García, J. Morató y J. Bayona (editores), *Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos*, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.

Rolim, S.

2000 *Sistemas de Lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío*, McGraw Hill, Institute Of Technology, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

San Vicente, C.

2003 *Tratamiento de aguas industriales: Aguas litorales. Herramientas de gestión y control de la calidad*, Fundación Universitaria Iberoamericana, Barcelona.

Sardiñas, O y A. Pérez

2004 *Determinación de nitrógeno amoniacal y total en aguas de consumo y residuales por el método del fenato*, Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología, Centro Habana, Cuba.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología

1987 *Norma Mexicana NMX-AA-099-1987. Protección al Ambiente-Calidad del Agua - Determinación de Nitrógeno de Nitritos en Agua*, Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología, Mexico, D.F.

1999 *NORMA Mexicana NMX-AA-113-SCFI-1999. Análisis de agua. Determinación de helmintos - método de prueba*, Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología, Mexico, D.F.

1980 *Norma Mexicana-AA-026-1980. Análisis de agua. Determinación total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*, Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología, Mexico.

2005 *Norma Mexicana-AA-083-SCFI-2005. Análisis de agua. Determinación de olor en aguas naturales y residuales. Método de prueba*, Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología, México, D.F.

Seoanez, M.

1999 *Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

1995 *Aguas residuales urbanas: Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento*, Mundi - Prensa, Madrid.

Soto, F. *et al.*

1999 “Role of *Scirpus lacustris* in bacterial and nutrient removal from wastewater” en *Water Science Technology*, 40(3), pp. 241-247.

Spigares, ME

2006 *Higiene y sanidad ambiental. Virus en aguas de consumo*, Facultad de Ciencias para la Salud, Universidad Nacional de Entre Ríos, Concepción del Uruguay.

Stearman, G. *et al.*

2003 “Pesticide removal from container nursery runoff in constructed wetland cells” en *Journal of Environmental Quality*, No 32, pp. 1548-1556.

Tapias, J.

2008 “Toma y conservación de la muestra”, presentación Power Point, Universidad de Barcelona, Facultat de Farmacia, Barcelona.

Ujang, Z. *et al.*

2004 “Landfill leachate treatment by an experimental subsurface flow constructed wetland in tropical climate countries” en *Environmental & water resource management*, University Teknologi Malaysia.

UNESCO

2003 World Water Assessment Programme, People and the Planet, en www.wateryear2003.org

Valdés, I., M.D. Curt y J. Fernández

2005 “Tolerancia de *Phragmites* y *Typha* a la contaminación del agua” en *Memoria del Encuentro Internacional en Fitodepuración*, Lorca.

Vargas, H.

2005 “Evaluación de la calidad del agua”, presentación Power Point, Universidad Agraria de La Habana, Sistema de Postgrado, La Habana.

Zúñiga, J. *et al.*

2004 “An assessment of domestic wastewater treatment in constructed wetlands in a region with variable climate in Chile” en *Congreso de Ingeniería Ambiental*, Avignon.

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.	9
Figura 2. Humedal artificial de flujo superficial.	9
Figura 3. Humedal subsuperficial de flujo horizontal (vista corte sección).	10
Figura 4. Humedal subsuperficial de flujo vertical (vista corte sección).	10
Figura 5. Diagrama del metabolismo del nitrógeno (Cooper et al., 1996).	16
Figura 6. Plantas heliófitas en medio acuático.	21
Figura 7. Totora en la ribera de una laguna.	22
Figura 8. Raíces y brotes de la totora.	23
Figura 9. Tallo de totora.	23
Figura 10. Corte transversal del tallo de totora.	23
Figura 11. Corte longitudinal del xilema y el floema en la totora.	23
Figura 12. Inflorescencia de la totora.	24
Figura 13. Totora implantada a densidad óptima.	25
Figura 14. Zona húmeda construida con totora.	26
Figura 15. Siembra de totora en grava.	27
Figura 16. Riego luego de la siembra de la totora.	27
Figura 17. Evolución del número de brotes por cada unidad experimental.	29
Figura 18. Levantamiento topográfico.	40
Figura 19. Replanteo.	40
Figura 20. Instalación eléctrica.	41
Figura 21. Dique excavado y dique elevado con muro de contención.	41
Figura 22. Cámaras de registro y control.	42
Figura 23. Caseta de bombeo.	42
Figura 24. Compactación del fondo.	43
Figura 25. Tendido y anclaje de la geomembrana.	43
Figura 26. Sistema de drenaje humedal horizontal.	44
Figura 27. Sistema de drenaje humedal vertical.	44

Figura 28. Detalle de sistemas de aplicación de humedal horizontal y dos verticales.	44
Figura 29. Esquema de una planta de tratamiento de aguas residuales y sus partes	47
Figura 30. Esquema de la medición de turbidez con nefelómetro.	55
Figura 31. Apariencia de colores en aguas tratadas.	56
Figura 32. Conductivímetro	56
Figura 33. Composición de los sólidos totales en aguas residuales.	57
Figura 34. Cono Imhoff.....	57
Figura 35. Clasificación de los sólidos en suspensión.....	58
Figura 36. Esquema de clasificación microbiológica en aguas residuales.	60
Figura 37. Clasificación de coliformes.	63
Figura 38. Determinación del número de bacterias por el método conteo directo.	64
Figura 39. Técnica de Cultivo en placa Petri.	64
Figura 40. Técnica de la membrana filtrante para la determinación de bacterias.....	65
Figura 41. Esquema para la determinación de estreptococos.....	66
Figura 42. Esquema del método DAL para la determinación de virus.....	68
Figura 43. Clasificación de los huevos de helmintos.	70
Figura 44. Esquema de la determinación de helmintos.	70
Figura 45. Parámetros químicos a medirse en aguas residuales.	73
Figura 46. Ciclo del Nitrógeno.	76
Figura 47. Proceso para la determinación de nitrógeno orgánico.....	77
Figura 48. Oxímetro.....	82
Figura 49. Esquema para determinar el Oxígeno Disuelto.	83
Figura 50. Determinación de DBO_5 en laboratorio.	84
Figura 51. Proceso para determinar la DBO_5	85
Figura 52. Proceso para la determinación de la DQO.....	86
Figura 53. Analizador de infrarrojos no dispersivo.	86
Figura 54. Procesos para determinar el Carbono Orgánico.....	87

Índice de cuadros

Cuadro 1. Características del uso de aguas residuales producidas en las principales ciudades del país.....	4
Cuadro 2. Estimaciones de los volúmenes de aguas residuales producidos en Bolivia.....	5
Cuadro 3. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales.	11
Cuadro 4. Características de las especies vegetales más utilizadas en humedales artificiales.	13
Cuadro 5. Mecanismos de remoción en los sistemas de tratamiento basados en macrófitas.	14
Cuadro 6. Comparación entre diferentes sistemas de flujo humedal.	19
Cuadro 7. Comparación entre humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical.	20
Cuadro 8. Capacidad depuradora de humedales con totora (<i>Scirpus spp.</i>).....	24
Cuadro 9. Resumen de los resultados de brotación.	28
Cuadro 10. Resultados de los parámetros iniciales evaluados.	29
Cuadro 11. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales.	33
Cuadro 12. Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo horizontal.	34
Cuadro 13. Características del substrato para diseño de humedales verticales.	37
Cuadro 14. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales verticales.	38
Cuadro 15. Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo vertical.	38
Cuadro 16. Valores referenciales de evaluación de agua para riego.	47
Cuadro 17. Ejemplo de cálculo de alícuotas para muestra compuesta.	49
Cuadro 18. Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras.	51
Cuadro 19. Compuestos olorosos asociados con aguas residuales.	54
Cuadro 20. Características de aguas residuales con relación al color.	56
Cuadro 21. Límites admisibles de sólidos sedimentables.	57
Cuadro 22. Límites admisibles de sólidos disueltos.	58
Cuadro 23. Características epidemiológicas de los patógenos excretados.....	59
Cuadro 24. Clasificación de microorganismos según fuente de carbono y energía.	60
Cuadro 25. Clasificación de las bacterias.....	61
Cuadro 26. Principales bacterias patógenas en aguas residuales.	62
Cuadro 27. Límites máximos para la descarga de colifecales en aguas residuales.....	65

Cuadro 28. Principales virus existentes en las aguas residuales y algunas de sus características.	67
Cuadro 29. Principales protozoarios patógenos existentes en las aguas residuales.	69
Cuadro 30. Clasificación del pH del agua.....	74
Cuadro 31. Composición típica de las células bacteriales.	74
Cuadro 32. Concentración de amonio según método del colorímetro.	77
Cuadro 33. Límites permisibles para el Nitrógeno Total de Kjeldahl.	78
Cuadro 34. Límites máximos para la concentración de nitritos.....	78
Cuadro 35. Límites máximos para la concentración de nitratos.....	79
Cuadro 36. Variación del contenido del fósforo en aguas residuales según pH.	79
Cuadro 37. Límites permisibles de concentración de Fósforo.	80
Cuadro 38. Límites permisibles para descargas de grasas y aceites en aguas.....	81
Cuadro 39. Efectos de diferentes concentraciones de oxígeno disuelto en un río.	82
Cuadro 40. Clasificación del agua según su contenido de oxígeno disuelto.....	83
Cuadro 41. Límites máximos permisibles de la concentración de la DBO_5	85
Cuadro 42. Límites permisibles para la concentración de la DQO.....	86
Cuadro 43. Comparación de relaciones DBO_5/DQO y DBO_5/COT	87

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1:	Determinación del área superficial	32
Ecuación 2:	Constante de reacción de primer orden.....	32
Ecuación 3:	Principio de Darcy para flujo en medios porosos	33
Ecuación 4:	Cálculo del ancho del humedal	33
Ecuación 5:	Cálculo del largo humedal	34
Ecuación 6:	Fórmula para el cálculo de la población equivalente.	35
Ecuación 7:	Cálculo del area superficial en humedal vertical	36
Ecuación 8:	Tasa hidráulica de aplicación	36
Ecuación 9:	Cálculo de la conductividad hidráulica para tratamiento primario	37
Ecuación 10:	Cálculo del caudal de infiltración para tratamiento primario.....	37
Ecuación 11	.....	56
Ecuación 12	.....	60
Ecuación 13	.....	76
Ecuación 14.	.....	78
Ecuación 15	.....	78

Glosario de términos

Abscesos subcutáneos. Aparición de pus debajo la piel.

Absorción. En química, es un proceso físico o químico en el cual átomos, moléculas o iones pasan de una primera fase a otra incorporándose al volumen de la segunda fase. Esta segunda fase puede ser líquida, gaseosa o sólida. Así pues, a diferencia de la adsorción, no es un proceso de superficie, sino de volumen.

Adsorción. Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen. En química, la *adsorción* de una sustancia es su acumulación en una determinada superficie. El resultado es la formación de una película líquida o gaseosa en la superficie de un cuerpo sólido o líquido. Considérese una superficie limpia expuesta a una atmósfera gaseosa. En el interior del material, todos los enlaces químicos (ya sean iónicos, covalentes o metálicos) de los átomos constituyentes están satisfechos, en cambio, por definición la superficie representa una discontinuidad de esos enlaces. Para esos enlaces incompletos, es energéticamente favorable el reaccionar con lo que se encuentre disponible, y por ello se produce de forma espontánea. La naturaleza exacta del enlace depende de las particularidades de los especímenes implicados.

Aerobios. Se denomina *aerobios* a los organismos que necesitan del oxígeno diatómico para vivir o a los procesos que lo necesitan para poder desarrollarse. El adjetivo *aerobio* se aplica no sólo a organismos sino también a los procesos implicados (*metabolismo aerobio*) y a los ambientes donde se realizan. Un *ambiente aerobio* es aquel rico en oxígeno, a diferencia de uno anaerobio, donde el oxígeno está ausente, o uno microaerofílico, donde el oxígeno se encuentra a muy baja concentración.

Afluyente. Aguas residuales crudas o brutas que proceden de la red de alcantarillado e ingresan a la planta de tratamiento.

Agar. Gel formado por hidratos de Carbono, es utilizado como medio de cultivo para las bacterias, ya que no se disuelve por efecto de las sales, ni se consume por la mayoría de los microorganismos.

Aguas residuales urbanas. Son las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial.

Amebiasis. Enfermedad que se presenta con diarrea espesa.

Amina. Nombre que reciben los compuestos producidos por la descomposición de la materia orgánica, y que se forman por sustitución de uno o varios átomos de hidrógeno del amoníaco por grupos orgánicos.

Anaerobios. Se llama *anaerobios* a los organismos que no necesitan oxígeno (O_2) para desarrollarse, a diferencia de los organismos aerobios. Los anteriores pueden dividirse en: los organismos anaerobios forzosos, que mueren en presencia de oxígeno; los organismos anaerobios facultativos, que pueden usar el oxígeno si está presente; y los organismos aerotolerantes, los cuales pueden vivir en presencia de oxígeno pero no hacen uso de él en forma alguna. Los organismos anaerobios utilizan la respiración anaerobia, más comúnmente llamada fermentación, para obtener energía química. Se encuentran estos organismos en rellenos sanitarios cuando se confina el parte orgánico de los residuos sin ningún tratamiento. Por la compactación se establece un ambiente anóxico en el cual los organismos anaerobios transfieren los partes orgánicas en décadas a gases de efecto invernadero: metano y dióxido de carbono.

Anorexia. Enfermedad que se caracteriza por la falta de apetito.

Azolve. Lodo o basura que obstruye un conducto de agua.

Bacilos. Bacterias en forma de bastón.

Bacterias. Nombre que reciben los organismos unicelulares y microscópicos, que carecen de núcleo diferenciado y se reproducen por división celular sencilla.

Balantidiasis. Enfermedad intestinal que se presenta con fuertes dolores abdominales, diarrea espesa, pegajosa y con sangre.

Batimetría. Estudio de las profundidades de lagunas mediante el trazado de mapas de isóbatas.

Biología molecular. Ciencia que se ocupa del estudio de las bases moleculares de la vida; es decir, relaciona las estructuras de las biomoléculas con las funciones específicas que desempeñan en la célula y en el organismo, como ser el ADN, ARN, división celular y otros.

Citopático. Consiste en alteraciones morfológicas de las células teniendo como resultado la muerte celular.

Clarificación. Aclarar el agua de sólidos suspendidos.

Coagulación. Proceso en que un sólido muy dividido que se encuentra en suspensión, o en dispersión coloidal, por adición de compuestos químicos pasa a estar formado por partículas de mayor tamaño.

Cocos. Bacterias en forma esférica.

Coliformes fecales. Grupo de bacterias que se encuentran en abundancia en el intestino del hombre. Se las utiliza como indicador de contaminación microbiológica de las aguas.

Colorimetría. Determinación de la concentración de una sustancia en una solución mediante la medición de la intensidad de color generado al reaccionar con un reactivo adecuado.

Conjuntivitis. Inflamación de la superficie interna de los párpados y de la superficie externa del globo ocular, e inclusive puede llegar a formar pus.

Criptosporidiasis. Enfermedad que se presenta con abundantes diarreas y muy líquidas.

DBO₅. Demanda bioquímica de oxígeno a los 5

días. Medida de la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación del material carbonoso de una muestra de agua, por la población microbiana, a lo largo de cinco días de incubación y a una temperatura de 20 °C.

Decantación. Procedimiento de separación de un líquido y un sólido insoluble (que no puede disolverse) en el, o de dos líquidos no miscibles (no se pueden mezclar), aprovechando así la acción de gravedad.

Degradación. Es la transformación de sustancias complejas en otras sustancias más sencillas.

Densidad. Masa de un cuerpo por unidad de volumen.

Desaminación. Proceso que consiste en la separación de la porción de la molécula que contiene nitrógeno, y que a continuación se combina con carbono y oxígeno para formar urea, amoníaco y ácido úrico.

Detritus. Es la descomposición de materias sólidas en partículas.

Dilución. Disminuir la concentración de una solución añadiendo un disolvente, el disolvente universal es el agua.

Disentería bacilar. Enfermedad aguda o crónica del intestino grueso, se caracteriza por diarreas líquidas y con sangre.

Disolución. Mezclar de forma homogénea las moléculas o iones de un sólido, un líquido o un gas en el seno de otro líquido, llamado disolvente.

Efluente. Aguas residuales procedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Eluido. Es una sustancia absorbida desde un lecho poroso o columna de cromatografía disolvente adecuado. Esta solución que se recoge del cromatógrafo de gases para posterior su análisis.

Epifluorescencia. Proceso que consiste en teñir a los microorganismos con un colorante fluorescente para posteriormente realizar la detección mediante microscopía de fluorescencia.

Espectrofotometría. Procedimiento analítico que consiste en usar el espectrómetro. Este es un aparato que mide la cantidad de luz absorbida por una sustancia en disolución y compara intensidades espectrales con respecto a una longitud de onda.

Espirilos. Bacterias en forma de espiral.

Esporulados. Bacterias que no forman esporas, las esporas no requieren de otro individuo para reproducirse sino que solo basta dividirse para dar lugar otro individuo.

Estación depuradora de aguas residuales. Unidad compuesta por instalaciones, estructuras o mecanismos que permitan una depuración por métodos físicos, físico-químicos, biológicos o alternativas tecnológicas similares del agua residual.

Eutrofización. Es el crecimiento desmesurado de algas y hierbas sobre la superficie del agua originando un excesivo consumo del oxígeno ocasionando que muchos otros microorganismos no puedan desarrollarse.

Filiariasis. Grupo de enfermedades que son transmitidas de persona a persona por la picadura de insectos. Existen tres tipos de enfermedades que pueden causar ceguera, inflamaciones y dolores en el escroto, ingles y piernas hasta inflamaciones de la piel.

Filtración. Proceso de separación de un sólido suspendido en un líquido al hacerlo pasar a través de un medio poroso con un tamaño de poro adecuado.

Floculación. Operación posterior a la coagulación, que consiste en dosificar compuestos químicos a las aguas residuales, para que los sólidos dispersos formen agregados más densos y más gruesos, llamados floculos, que facilitan su separación del agua por decantación o filtración.

Flotación. Técnica de concentración donde las partículas de interés permanecen en la superficie de la solución cuya densidad es mayor.

Fotometría. Medida de la intensidad luminosa de una fuente de luz, o de la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie.

Fotosíntesis. Proceso en el cual los organismos con clorofila, como las plantas verdes, las algas y algunas bacterias, capturan energía en forma de luz y la transforman en energía química. Es uno de los procesos químicos más importantes que ocurre en las plantas, algas y algunas bacterias. Durante el día, los organismos toman dióxido de carbono del aire y, en presencia de agua y la luz solar, lo convierten en oxígeno e hidratos de carbono, que se usan para producir más plantas.

Gastroenteritis. Enfermedad infecciosa aguda del estómago y el intestino, causada por

virus (rotavirus, virus Norwalk), bacterias o protozoos. Se caracteriza por una inflamación de la membrana de la mucosa del estómago y los intestinos

Giardiasis. Enfermedad que se presenta con dolores abdominales, acumulación de gases en el tubo digestivo (flatos) y las heces son grasosas.

Gravimetría. Análisis cuantitativo de una sustancia por medio de la pesada

Helmintos. Grupo heterogéneo de gusanos parásitos que infestan el tubo digestivo y otros órganos internos de los vertebrados.

Hemoglobina. Pigmento especial que predomina en la sangre cuya función es el transporte de oxígeno.

Hepatitis. Inflamación aguda del hígado.

Hidrólisis. Es una reacción química en la que una molécula de agua, reacciona con una molécula de una sustancia AB. En la reacción, la molécula de agua se descompone en los fragmentos H⁺ y OH⁻ y la molécula AB se descompone en A⁺ y B⁻. A continuación, estos fragmentos se unen proporcionando los productos finales AOH y HB.

Infiltración. Flujo del agua o de otro fluido a través de los poros de un cuerpo sólido. Flujo del agua a través del suelo.

Insoluble. Sustancia que no puede disolverse ni diluirse en solventes. Por ejemplo, el agua y el aceite.

Ión. Átomo o grupo de átomos que ha perdido o adquirido uno o más electrones y por tanto posee una cierta carga positiva o negativa. Los iones con carga positiva reciben el nombre de cationes y los que tienen carga negativa aniones.

Leptopirosis. Enfermedad infecciosa grave que afecta al hígado y otros órganos. Esta enfermedad es un peligro profesional entre trabajadores de alcantarillas, plantadores de arroz y granjeros.

Lodo. Residuo de consistencia pastosa, más o menos cargado de agua que proviene de la depuración de aguas residuales. Se caracteriza por contener elevadas concentraciones de materia orgánica.

Macrófitas. Constituyen formas macroscópicas de vegetación acuática. Comprenden las macroalgas, las pteridofitas (musgos, helechos) adaptadas a la vida acuática y las angiospermas.

Presentan adaptaciones a este tipo de vida tales como: cutícula fina, estomas no funcionales, estructuras poco lignificadas.

Meningitis. Inflamación de las meninges o membranas que envuelven el encéfalo (órganos del sistema nervioso) y la médula espinal

Meningoencefalitis. Inflamación del cerebro, afecta principalmente al sistema nervioso central, esta enfermedad puede conducir a un estado de coma (muerte cerebral).

Microelementos. Son sustancias inorgánicas que se requiere en mínimas cantidades, pero que son esenciales para el crecimiento de las plantas, animales, algas y microorganismos.

Nata. Material sólido flotante donde se acumulan sólidos suspendidos, restos de algas, material plástico y otros originando que no se realice una buena oxigenación del agua y que la luz no pueda llegar hasta las capas más profundas.

Nefelómetro. Instrumento utilizado para medir la turbidez de los líquidos.

Oxígeno disuelto. Es la cantidad de oxígeno existente en el agua, se expresa en partes por millón o mg/l; este parámetro es muy importante para la respiración de las bacterias aerobias durante el proceso de depuración de aguas residuales.

Patógenos. Que originan una enfermedad.

Poliomielitis. Enfermedad infecciosa viral del sistema nervioso central que en muchos casos provoca, como secuela, una parálisis.

Polución. Contaminación intensa y dañina del agua o del aire, producida por los residuos de procesos industriales o biológicos.

Precipitado. Es el sólido que se produce en una disolución por efecto de una reacción química. A este proceso le llamamos *precipitación*. La precipitación puede ocurrir cuando una sustancia insoluble se forma en la disolución debido a una reacción química o a que la disolución ha sido sobresaturada por algún compuesto, esto es, que no acepta más soluto y que al no poder ser disuelto, dicho soluto forma el precipitado. En la mayoría de los casos, el precipitado (el sólido formado) cae al fondo de la disolución, aunque esto depende de la densidad del precipitado: si el precipitado es más denso que el resto de la disolución, cae, si es menos denso, flota, y si tiene una densidad similar, se queda en suspensión.

Proteína. Es el principal componente del organismo animal, pero está también en las plantas, algas y en bacterias. Compuestos orgánicos constituidos por aminas.

Quiste. Organismo en estado líquido o semisólido dentro de una cápsula con una estructura en forma de saco que a veces puede estar abierta, las paredes del quiste están formadas por tejido conectivo o por fibras musculares.

Retención. Relación entre el volumen del tanque y el caudal afluente, también se denomina tiempo de llenado.

Sedimentación. La sedimentación es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin. Toda corriente de agua, caracterizada por su caudal, tirante de agua, velocidad y forma de la sección tiene una capacidad de transportar material sólido en suspensión. El cambio de alguna de estas características de la corriente puede hacer que el material transportado se sedimente; o el material existente en el fondo o márgenes del cauce sea erosionado. La sedimentación de sólidos en líquidos está gobernada por la ley de Stokes, que indica que las partículas sedimentan más fácilmente cuando mayor es su diámetro, su peso específico comparado con el del líquido, y cuando menor es la viscosidad del líquido. Por ello, cuando se quiere favorecer la sedimentación se trata de aumentar el diámetro de las partículas, haciendo que se agreguen unas a otras, proceso denominado coagulación y floculación.

Simbiosis. Relación en la que dos o más organismos (denominados cooperantes o simbiosis) obtienen un beneficio mutuo.

Urea. Compuesto cristalino incoloro, de fórmula $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, conocido también como carbamida. Se encuentra abundantemente en la orina de los humanos y otros mamíferos.

Volumetría. También llamada valoración química, método químico para medir cuánta cantidad de una disolución se necesita para reaccionar exactamente con otra disolución de concentración y volumen conocidos.

Apuntes

A series of horizontal dotted lines for writing notes.

Blanca

reverso contratapa

Este libro es el resultado de la experiencia de un proyecto de investigación-acción denominado “Zonas húmedas construidas para la depuración de aguas residuales” (Proyecto HUMEDAL). El proceso de investigación interactivo conjugó las capacidades y experiencias de un equipo de docentes investigadores de la Universidad de Barcelona (UB) y del Centro AGUA de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS).

La investigación se inició con la construcción de un humedal en la planta de tratamiento de aguas residuales del Municipio de Punata. Continuó con la construcción de otros dos humedales, uno en la comunidad de Thaço (Punata) y otro en predios de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias, Forestales y Veterinarias (FCAPFyV) de la UMSS. Simultáneamente, se iniciaron trabajos de investigación sobre aspectos hidráulicos, fitotécnicos y ambientales. Tales actividades se complementaron con discusiones y capacitación a organizaciones y agricultores locales, quienes en algún momento deberán hacerse cargo de la gestión de estos sistemas.

Intercambios de docentes e investigadores de España a Bolivia y viceversa, permitieron al equipo del Centro AGUA, generar los conocimientos, experiencias y habilidades para implementar los procesos de diseño y construcción de los humedales.

Esperamos que este libro constituya un aporte al conocimiento y al desarrollo de capacidades locales orientadas a enfrentar con mayores fortalezas el reto del tratamiento y re-uso de aguas residuales para lograr una mayor calidad ambiental y al mismo tiempo mejorar la disponibilidad de agua para usos agropecuarios.



ISBN: 978-99954-766-2-5

