



UCH-FC
Q. Ambiental
S 456
C-1

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE QUÍMICA AMBIENTAL**



**ESTUDIO QUÍMICO ANALÍTICO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DOMICILIARIAS E INDUSTRIALES**

Prof. Patrocinante : Fernando Mendizábal
Director Seminario : Pablo Richter
Corrector : María Inés ~~toral~~ - Julio Hidalgo

23 Agosto 2001

RODRIGO JOSÉ SEGUEL ALBORNOZ



“Existiendo e imaginando en la interfase de dos infinitos, tiempo y espacio”

Dedicado a la memoria de mi padre y a mi querida amiga y madre.

AGRADECIMIENTOS



Quisiera agradecer especialmente la asistencia prestada por el Dr. Pablo Richter y el Ing. Cristián Borie, como también la de todo el personal del laboratorio de Química Ambiental y del Centro Nacional del Medio ambiente.

INDICE DE MATERIAS



I. INTRODUCCIÓN	1
II. ASEGURAMIENTO DE CALIDAD (QA/QC) DE LA INFORMACIÓN ANALÍTICA	4
1. REPRESENTATIVIDAD	9
1.1 Programa de muestreo	9
1.2 Obtención de muestras representativas.....	10
1.3 Punto de muestreo de aguas residuales.....	10
1.4 Tipos de muestreos	11
1.5 Toma de muestra	12
2. EXACTITUD	18
3. VALIDACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS	19
3.1 Interferente.....	19
3.2 Sensibilidad	19
3.3 Límite de detección	20
3.3.1 Límite de detección instrumental (LDI)	20
3.3.2 Límite de detección del método (LDM).....	21
3.4 Límite de cuantificación del método (LCM).....	21
3.5 Intervalo de linealidad o de determinación.....	22
3.6 Precisión	22
3.6.1 Replicabilidad.....	22
3.6.2 Repetibilidad.....	22
3.6.3 Reproducibilidad	23
3.7 Exactitud.....	23
3.8 Recuperación	24
III. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	25



1. LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.....	25
1.1 LAGUNAS FACULTATIVAS.....	26
1.1.1 Principio teórico.....	26
1.1.2 Condiciones de operación.....	28
1.1.3 Riesgos ambientales.....	30
2. LAGUNAS AERADAS.....	32
2.1 LAGUNAS AERADAS FACULTATIVAS.....	32
2.1.1 Principio teórico.....	32
2.1.2 Condiciones de operación.....	32
2.1.3 Riesgos ambientales.....	33
3. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE TIPO BIOLÓGICO CONVENCIONAL.....	34
3.1 CULTIVO SUSPENDIDO AERÓBICO (LODOS ACTIVADOS).....	34
3.1.1 Principio teórico.....	34
3.1.2 Parámetros de diseño.....	38
3.2 CULTIVO FIJO (LECHOS BACTERIANOS).....	40
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
1. VALIDACIÓN DE MÉTODOS PARA ANALISIS DE AGUAS Y RILES.....	42
2. VALIDACIÓN SISTEMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO KJELDAHL POR MÉTODO POTENCIOMÉTRICO CON DIGESTIÓN PREVIA.....	44
2.1 EXACTITUD.....	44
2.2 PRECISIÓN.....	45
2.2.1 Replicabilidad.....	45
2.2.2 Repetibilidad.....	45
2.3 LÍMITE DE DETECCIÓN.....	46
2.4 SENSIBILIDAD.....	47
2.5 SELECTIVIDAD (INTERFERENTES).....	47
2.5.1 Nitrato.....	47
2.5.2 Sales inorgánicas y sólidos.....	48
2.5.3 Materia orgánica.....	48



2.6 RECUPERACIÓN	49
3. PLANTAS DE TRATAMIENTO	50
3.1 PT RILES FÍSICO Y QUÍMICOS Y/O BIOLÓGICO	51
3.1.1 PT RIL 1, lodos activados	54
3.1.2 PT RIL 2, tratamientos físicos, químicos y biofiltros	57
3.1.3 PT RIL 3, tratamientos físicos y químicos	59
3.2 PT AS, LAGUNAS AERADAS FACULTATIVAS	60
3.2.1 Macronutrientes, nitrógeno y fósforo	70
3.2.2 Calidad bacteriológica, coliformes fecales o termotolerantes	72
3.2.3 Pesticidas, triclorometano y tetracloroetano.....	72
3.2.4 DBO ₅ , sólidos suspendidos, aceites y grasas, y poder espumógeno	73
3.3 PT AS LAGUNAS FACULTATIVAS EN SERIE Y/O PARALELO.....	75
3.3.1 Macronutrientes, nitrógeno y fósforo	82
3.3.2 Calidad bacteriológica, coliformes fecales o termotolerantes	82
3.3.3 DBO ₅ , sólidos suspendidos, aceites y grasas, y poder espumógeno	82
3.4 EMISARIOS SUBMARINOS	84
V. CONCLUSIÓN.....	89
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	92

LISTA DE TABLAS



1. Condiciones de extracción de la muestra	16
2. Resumen de validaciones efectuadas en RILES.....	42
3. Validación NTK (Exactitud)	45
4. Validación NTK (Repetibilidad)	46
5. Validación NTK (LD)	46
6. Validación NTK (Sensibilidad).....	47
7. Validación NTK (Recuperación).....	49
8. Resumen validación NTK en RIL	49
9. Clasificación industrial uniforme CIU	51
10. Resultados calidad de efluentes PT RIL 1, lodos activados	53
11. Resultados calidad de efluentes PT RIL 2, tratamientos físicos, químicos y biofiltros	56
12. Resultados calidad de efluentes PT RIL 3, tratamientos físicos y químicos.....	59
13. Resultados calidad de efluentes PT laguna aerada facultativa 1	62
14. Resultados calidad de efluentes PT laguna aerada facultativa 2	64
15. Resultados calidad de efluentes PT laguna aerada facultativa 3	66
16. Resultados calidad de efluentes PT laguna aerada facultativa 4	68
17. PT Lagunas aeradas facultativas (P y N).....	70
18. Operaciones, procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para abatir P y N	71
19. PT Lagunas aeradas facultativas (SS, PE, DBO ₅ y A y G).....	74
20. Parámetros de control de lagunas aeradas facultativas.....	74
21. Resultados calidad de efluentes PT lagunas facultativas 1.....	77
22. Resultados calidad de efluentes PT lagunas facultativas 2.....	79
23. Resultados calidad de efluentes PT lagunas facultativas 3.....	81



24. Parámetros de control de lagunas facultativas.....	83
25. Resultados calidad de efluentes emisario 1	85
26. Resultados calidad de efluentes emisario 2	86

LISTA DE FIGURAS

1. Problema analítico ilustrado como una interfase.....	5
2. Propiedades analíticas.....	7
3. Representación esquemática de un PMQ	8
4. Muestreador automático marca Sigma modelo 900	14
5. Visión interior de un muestreador automático marca Sigma modelo 900	15
6. Laguna de estabilización facultativa.....	27
7. Relación simbiótica cíclica entre algas y bacterias	29
8. Diagrama de flujo de una planta convencional de lodos activados.....	37
9. Diagrama de flujo PT RIL 1, lodos activados	52
10. Diagrama de flujo PT RIL 2, tratamientos físicos, químicos y biofiltros	55
11. Diagrama de flujo PT RIL 3, tratamientos físicos y químicos	58
12. Diagrama de flujo PT laguna aerada facultativa 1	61
13. Diagrama de Flujo PT laguna aerada facultativa 2.....	63
14. Diagrama de Flujo PT laguna aerada facultativa 3.....	65
15. Diagrama de Flujo PT laguna aerada facultativa 4.....	67
16. Diagrama de Flujo PT lagunas facultativas 1	76
17. Diagrama de Flujo PT lagunas facultativas 2	78
18. Diagrama de Flujo PT lagunas facultativas 3	80

LISTA DE ABREVIATURAS

AS	Aguas servidas
A y G	Aceites y grasas
CBR	Contactores biológicos rotatorios
CIIU	Clasificación industrial internacional uniforme
DAF	Dissolved Air Flotation
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno, 5 días
DIRECTEMAR	Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante
LCM	Límite de cuantificación del método
LDI	Límite de detección instrumental
LDM	Límite de detección del método
MCO	Máxima carga orgánica
MRC	Material de referencia certificado
NMP	Número más probable
NTK	Nitrógeno total kjeldahl
PAL	Performance Acceptance Limits
PMQ	Proceso de medida química
PT	Planta de tratamiento
QA	Quality Assurance
QC	Quality Control
RIL	Residuo industrial líquido
RIS	Residuo industrial sólido
SBR	Sequencing Batch Reactor
SISS	Superintendencia de Servicios Sanitarios
SS	Sólidos suspendidos

S Sed	Sólidos sedimentables
SSLM	Sólidos suspendidos del licor mezclado
SSVLM	Sólidos suspendidos volátiles del licor mezclado

RESUMEN

En este estudio se presenta una evaluación de diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales desde una perspectiva químico analítica. De esta forma se busca establecer, previo conocimiento de los procesos y tratamientos involucrados, la efectividad de estos sistemas de purificación básicamente bajo el criterio de la conformidad con la normativa actual del país.

Los resultados derivados de los sistemas de tratamiento en base a lagunas aeradas, revelan que el parámetro DBO_5 se encuentra sobre el límite permitido en las cuatro plantas que fueron fiscalizadas. Esto es especialmente inquietante, considerando que el objetivo de este tratamiento es justamente la disminución de la DBO_5 en conjunto con el abatimiento de los sólidos suspendidos. Por otro lado, la aeración suministrada en estos sistemas genera una no conformidad con la normativa vigente, relacionada a la mayor concentración de nutrientes desprendidos desde una materia orgánica mayormente degradada. Esta situación, debe ser abordada con cautela considerando la iniciativa de muchas sanitarias de transformar los sistemas en base a lagunas facultativas a lagunas aeradas, lo cual ha sido corroborado en terreno .

Las lagunas facultativas fiscalizadas no exhiben concentraciones sobre la norma en relación a los nutrientes, debido a su menor eficiencia para degradar la materia orgánica comparativamente a lagunaje con aeración. No obstante, presentan una no conformidad en lo relativo al abatimiento bacteriológico, debido a que las plantas estudiadas no integran en sus procesos la desinfección. Por último, la DBO_5 en general se encuentra bajo la norma, aunque se describe un caso en el cual se esta por sobre ella, el que además se relaciona con un alto contenido de Coliformes Fecales.

En localidades costeras la alternativa en práctica la presentan los emisarios submarinos, correspondientes a un vertido directo al mar que ofrece ventajas económicas y técnicas que, como se ha verificado en los dos casos estudiados no contemplan pretratamientos configurándose por tanto, solo en una forma de disposición de residuos.

Finalmente en este estudio se evalúan plantas de tratamiento industriales que han sido adaptadas de acuerdo a los requerimientos particulares de cada una de ellas, exhibiendo en general un buen ajuste a la normativa exceptuando nuevamente los parámetros relativos a nutrientes.

I. INTRODUCCIÓN

Hasta la década de los 80', los sistemas de tratamiento para aguas residuales domiciliarias implementados en localidades no costeras del país, prácticamente en su totalidad consistieron en lagunas de estabilización. Sin embargo, el comportamiento de este tipo de sistemas, especialmente en términos de remoción bacteriológica, sobrecarga orgánica, requerimientos de superficies, costo asociado de los terrenos y restricciones relacionadas con las condiciones ambientales entre otros, marcaron un cambio en la tendencia a partir de la segunda mitad de la década recién pasada, empezando a ser consideradas las alternativas de tratamiento biológico de tipo convencional.

Entre estas alternativas, cabe señalar que los sistemas en base a lagunas aeradas son especialmente aplicables en aquellas localidades que cuentan con sistemas por lagunas de estabilización construidos, debido a que requieren pequeños trabajos de transformación que permiten obtener resultados y costos más eficientes. Esto, ha sido comprendido por el sector sanitario, puesto que la tendencia actual al interior del país es hacia la transformación de las lagunas de estabilización a lagunas aeradas seguidas de desinfección.

Por otro lado, el tratamiento por lodos activados en la versión aeración extendida, se ha constituido en el tipo de tratamiento que mayormente se ha implementado en localidades no costeras con excepción de Santiago y Concepción, las que por su tamaño contemplan soluciones en base a lodos activados del tipo convencional. En las localidades costeras, la tecnología más aplicada la constituyen los emisarios submarinos precedidos, sólo en algunos casos de tratamiento preliminar, consistente en desbaste y/o cámara de aceite y grasa.

En relación a los sistemas de tratamiento de residuos industriales líquidos, se incorporan a los mencionados sistemas biológicos convencionales, sistemas de tratamiento terciarios como neutralización, desinfección, o floculación y coagulación, presentándose casos, en los cuales el tratamiento es únicamente terciario.

Esta visión general de carácter nacional, permite vislumbrar una cierta homogeneidad de los sistemas de tratamiento de aguas servidas, dependiente del sector geográfico, la cantidad de habitantes, y los recursos disponibles a invertir en la zona. Estas variables, determinan el tipo de tecnología a implementar.

Este esquema actual nos introduce un problema económico-social y ambiental cuya responsabilidad debe ser abordada por las autoridades competentes, cuya responsabilidad sobre la calidad del entorno, les faculta evaluar el correcto funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias e industriales.

La información química analítica y bioquímica requerida en este caso por la SISS y la DIRECTEMAR, cuya jurisdicción dependerá si el medio receptor es continental o marino, se verá reflejada ya sea en la implementación de nuevas plantas de tratamiento de aguas, como también en la puesta en marcha de nuevas tecnologías de abatimiento, o en la confirmación de que los medios receptores no están siendo menoscabados o disminuidos en términos de su calidad. Esto redundará en que la autoridad competente, deberá tomar decisiones con plena confianza de no incurrir en errores que pueden ocasionar pérdidas económicas a las partes interesadas, o que puedan resultar en un detrimento del medio ambiente.

Por esto, es de vital relevancia confiar la responsabilidad de un estudio químico analítico, en un laboratorio que cuente con un sistema de calidad, el cual contribuya a alcanzar tanto su calidad, como la del organismo fiscalizador que solicita dicho estudio, esto último a través de la satisfacción de sus necesidades informativas, que en este caso se materializan en la contrastación de la información recogida por el laboratorio con las respectivas normas vigentes o resoluciones pactadas entre las partes.

Todo este marco conceptual, en definitiva, descansará sobre la base de la obtención de información exacta y representativa, lo que será de exclusiva responsabilidad del sistema de calidad QA/QC implementado por el laboratorio. Es por ello que en este estudio se focalizarán los esfuerzos en primer lugar, en la realización de procedimientos de muestreo para aguas residuales domésticas e industriales, considerando la relevancia que produce el diseño adecuado del programa y las técnicas de toma de muestras en la representatividad.

En segundo lugar, se determinarán parámetros físicos, químicos y biológicos utilizando métodos analíticos validados, que proporcionarán el apoyo informativo que más tarde

permitirá evaluar el funcionamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales y domiciliarias, procurando la reserva de las plantas de tratamiento involucradas en este estudio. Para lograr dicha evaluación, será fundamental realizar una descripción de estos sistemas en términos de sus componentes unitarios y sus parámetros más relevantes. Todo esto permitirá plantear las desviaciones, si existiesen, y su consecuente fundamento.

En este estudio, también se contempla en su fase inicial, la validación de la determinación de nitrógeno kjeldahl por método potenciométrico con digestión previa, con la finalidad de conocer los fundamentos teóricos que rigen una validación, y en su forma práctica, la metodología que permite alcanzarla, logrando de esta forma interiorizarse con el sistema de calidad desde una perspectiva funcional, que redundará en un mejor desenvolvimiento en términos productivos.

Finalmente cabe señalar que, el siguiente seminario de título se realizará en el centro nacional del medio ambiente (CENMA), contándose dentro de sus objetivos los siguientes:

a) Objetivo general

- Generar de información analítica validada para el control del funcionamiento de plantas de tratamiento de RILES y/o aguas residuales domiciliarias.

b) Objetivos específicos:

- Muestreo representativo de efluentes de plantas de tratamiento de aguas.
- Validación de métodos analíticos para el análisis de efluentes.
- Análisis de muestras y determinación de parámetros normados.

II. ASEGURAMIENTO DE CALIDAD (QA/QC) DE LA INFORMACIÓN ANALÍTICA

La política de la fundación CENMA, busca satisfacer con el más alto estándar de calidad, las necesidades actuales y futuras de mediciones y análisis de información ambiental, en sectores públicos y privados del país.

Esta política de calidad plasmada en un manual de calidad, en la práctica se traduce en elementos de gestión y sistemas operativos que se materializan en el denominado aseguramiento de calidad (Quality Assurance), que se define como el marco de un conjunto de actividades y mecanismos que contribuyen a demostrar la eficacia del sistema de calidad implementado en el laboratorio.

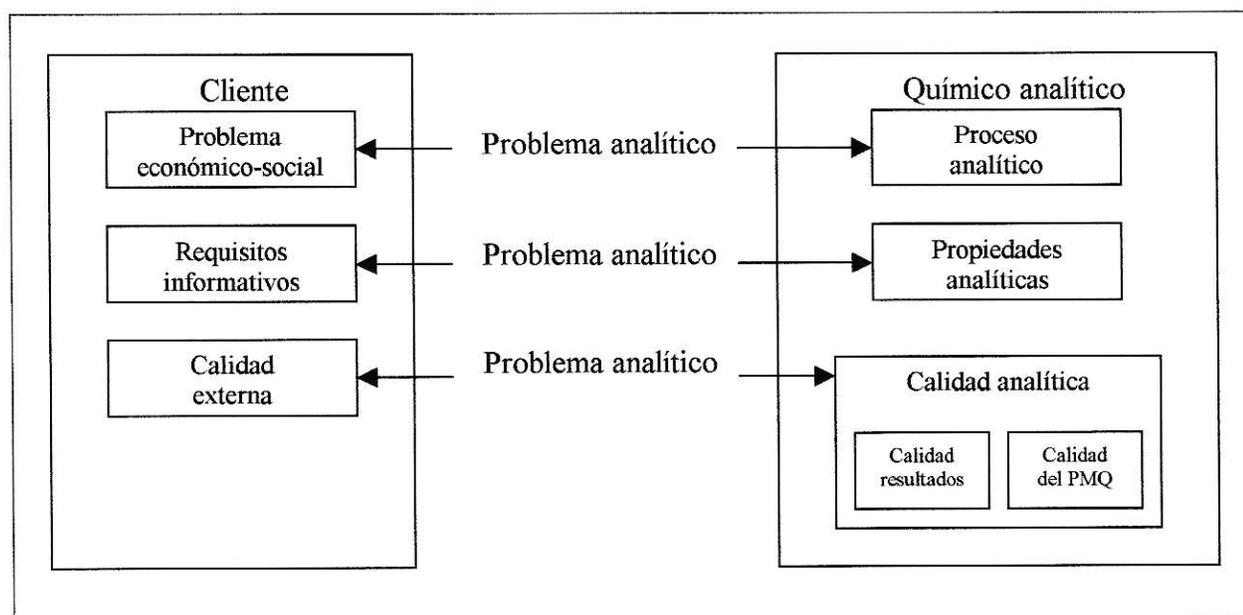
El aseguramiento de calidad consta de actividades bien definidas, como el control de calidad (Quality Control) que implica fundamentalmente un examen tanto del laboratorio como de los resultados generados, utilizando indicadores fundamentalmente cuantitativos. Por otro lado, la evaluación de la calidad (Quality Assessment) implica tanto el examen del control de calidad y del laboratorio como de los resultados generados y su relación con la resolución del problema analítico.

Como consecuencia de las actividades de aseguramiento de calidad, deben desarrollarse las acciones obvias correctivas y preventivas para las no-conformidades, los reclamos y las desviaciones a las especificaciones, que afectan inicialmente al laboratorio, pero que deberán repercutir en la calidad de los resultados analíticos y contribuir a mejorar la capacidad del laboratorio para resolver problemas analíticos.

El problema analítico se entiende como la conexión coherente entre el problema económico-social, los requisitos informativos y la calidad externa del ente, con el proceso analítico, los tres tipos de propiedades analíticas y la calidad analítica respectivamente (figura 1).

De esta forma, un componente básico esencial de la calidad analítica es la resolución del problema analítico, lo que implica que se ha satisfecho la necesidad informativa del cliente y

Figura N°1
Problema analítico ilustrado como una interfase



existe coherencia entre la información analítica requerida por el mismo y la suministrada por el laboratorio, por lo que se ha alcanzado la calidad analítica requerida para soportar la calidad externa que se corresponde con el problema económico social del cliente.

De esta forma se hace patente que la calidad de los resultados analíticos es, sin duda, uno de los aspectos de mayor relevancia dentro del aseguramiento de calidad. Esta se materializa en dos propiedades analíticas supremas, que son la exactitud y la representatividad, siendo su integración imprescindible, y como veremos a lo largo de este estudio, alcanzar la calidad de los resultados será una de nuestras preocupaciones (figura 2).

El muestreo correcto puede considerarse una característica analítica básica, y es el soporte de la propiedad analítica suprema, la representatividad. El muestreo o toma de muestra que es la primera de las subetapas de las operaciones previas, está inserta dentro del proceso de medida química, (figura 3) y con frecuencia, integra otras subetapas, tales como la conservación, para reducir la pérdida de trazas del constituyente de interés.

Figura N°2
Propiedades analíticas

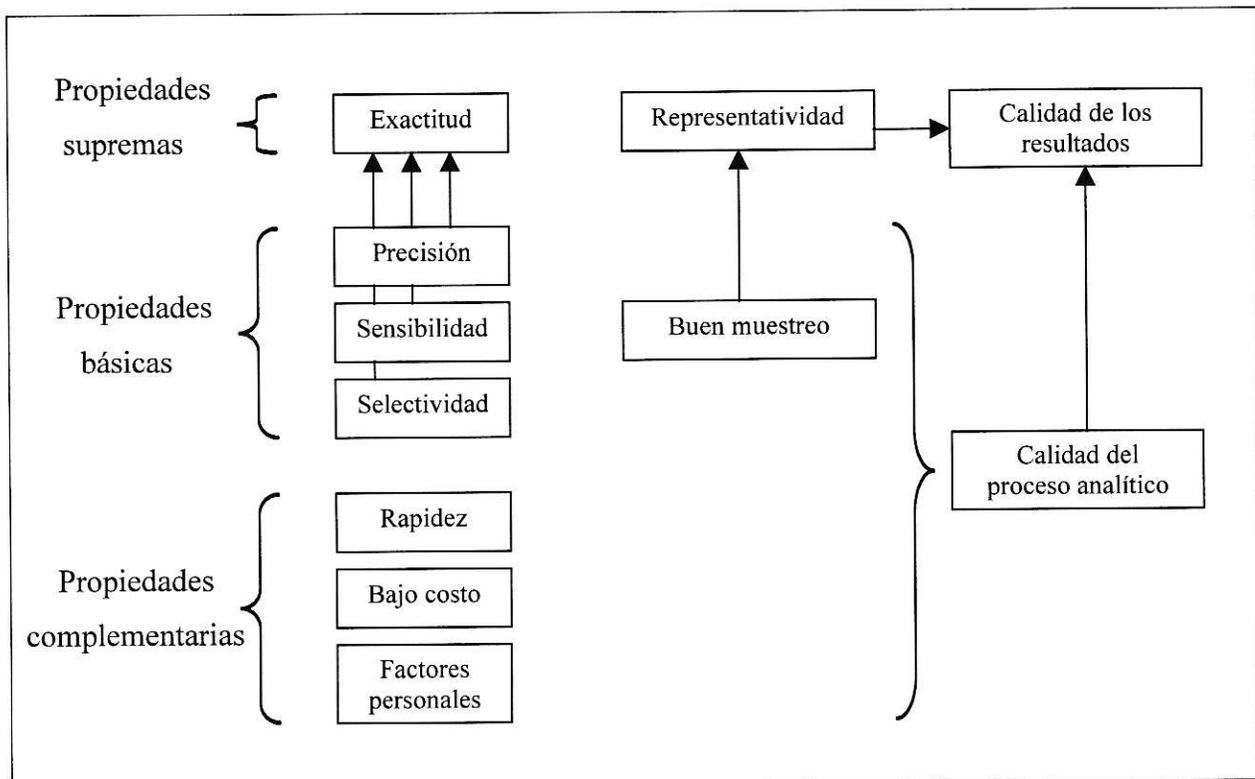
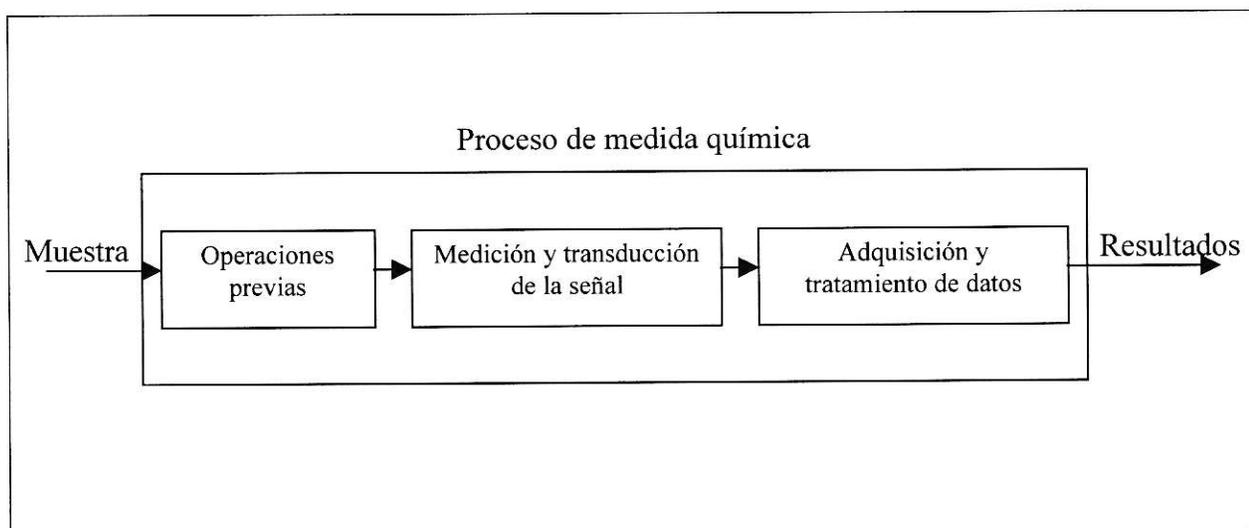


Figura N°3
Representación esquemática de un PMQ



1. REPRESENTATIVIDAD

1.1 Programa de muestreo

Se define el programa de muestreo como la estrategia que se debe seguir para garantizar la representatividad de los resultados de un PMQ con el problema analítico planteado. El programa de muestreo debe contar con la siguiente información:

- Objetivo del muestreo.
- Identificación del lugar, fecha de muestreo y duración del muestreo. Se debe incluir además un mapa del lugar que identifique el punto de muestreo, considerando que su determinación es uno de los elementos críticos para obtener muestras representativas.
- Origen de la muestra (agua subterránea, agua superficial, agua residual).
- Número de muestras y tipo de matriz (agua de bebida, agua residual industrial, agua residual agrícola, etc.).
- Frecuencia del muestreo (mensual, semanal, etc.).
- Tipo de muestra.
- Método de toma de muestra.
- Necesidad de parámetros a analizar indicando el método y su referencia.
- Mediciones en terreno.
- Requerimientos de control de calidad en terreno.
- Persona(s) que realizó el muestreo.
- Registro de la información.

Estos elementos de programación proveen una importante ayuda para la concreción de muestreos exitosos y para la verificación de la cadena de custodia.

1.2 Obtención de muestras representativas

Durante la realización de un muestreo hay dos criterios que deben ser considerados, estos son la representatividad de las muestras y su integridad. El primero de ellos, la representatividad del muestreo, se logra mediante el estudio cuidadoso de los objetivos del plan de muestreo con la finalidad de determinar el punto en que se realizará este. El segundo de ellos, la integridad de la muestra, es el resultado de los procedimientos que involucran la toma de muestras, la preservación de las muestras y el transporte ellas.

1.3 Punto de muestreo de aguas residuales

Las muestras más representativas se consiguen aguas abajo de la corriente de agua residual antes de que ésta sea descargada al cuerpo receptor. Esta información se detallará más adelante en los diagramas de flujo de las plantas de tratamiento.

Los puntos de muestreo deben cumplir con las siguientes características:

- Las características del flujo deben ser tales que favorezcan cabalmente las condiciones de mezcla de las aguas.
- La velocidad de flujo en el punto de toma de muestra deberá ser lo suficientemente alta como para asegurar que en este punto no hay depósito de sólidos.
- Si se aprecia flujo laminar, se debe inducir un flujo turbulento restringiendo el flujo (por ejemplo con un desviador o vertedero), sin llegar a producir sedimentación corriente arriba.
- Debe tener correspondencia con el punto de medición de caudal.
- No debe tener incrustaciones, barro, películas bacterianas, etc.
- En el momento de recoger la muestra, es conveniente asegurar que no se produzcan turbulencias excesivas que pudiesen liberar los gases disueltos.

Si los lugares de toma de muestra preestablecidos, descritos en el permiso o resolución del organismo competente, o en el plan proyectado, no son accesibles para la toma de muestra representativa, el responsable puede determinar el mejor punto de muestreo, documentando en detalle las razones del cambio de punto de muestreo.

1.4 Tipos de muestreos

Las técnicas de muestreo utilizadas en el estudio de una descarga, deben asegurar la obtención de muestras representativas. No existen procedimientos universales de muestreo, por lo que estas deben diseñarse específicamente para cada situación.

El muestreo puntual, representa la condición que existe en el efluente al momento de la toma de muestra, por lo tanto, el tiempo de muestreo no debe exceder los 15 minutos. Para este caso la obtención de la representatividad, dependerá de la elección de un punto donde el agua residual alcance una mezcla homogénea, tanto como sea posible.

En el muestreo puntual, el contenedor se debe invertir y llenar sumergiéndolo bajo la superficie de la corriente residual. En general las muestras simples se extraen manualmente, pero también se pueden extraer usando equipos de muestreo automáticos.

Este tipo de muestreo no siempre proporciona una medida exacta de las características del agua residual, especialmente cuando el flujo es heterogéneo, o varía en el tiempo.

Dentro de los parámetros que podemos mencionar en este estudio, que fueron muestreados puntualmente se encuentran.

- Aceites y grasas.
- Coliformes fecales.
- Triclorometano.
- Tetracloroetano.

Las muestras puntuales son esenciales cuando el objetivo del programa de muestreo es verificar el cumplimiento de normas no relacionadas con la calidad promedio. En los casos en que el cumplimiento de la calidad se juzgue en base a la calidad promedio del efluente, siempre se debe recurrir a muestras compuestas.

El muestreo compuesto es aquel en que se recolecta en forma secuencial, en un período de tiempo, volúmenes iguales de muestra, las que son combinadas en un único recipiente. El muestreo compuesto entrega información del promedio de las características durante el tiempo de composición.

Este procedimiento proporciona una evaluación parcial de la variabilidad de la composición de la calidad del agua residual con el tiempo.

El grado de variación del caudal condiciona el intervalo de tiempo de muestreo, el cual, debe ser un tiempo lo suficientemente corto como para que la representatividad de la muestra sea la máxima. Sin embargo, se debe considerar que se presentan casos en los cuales la variación del caudal es muy pequeña y la concentración de los constituyentes presenta grandes variaciones.

Los parámetros compuestos evaluados en las Sanitarias fueron efectuados en un periodo de 24 horas (Tabla 1). Para el caso de las PT de RIL se describirá con mayor precisión más adelante. Por último, el muestreo compuesto proporcional al caudal no se realizó en este estudio.

1.5 Toma de muestra

El muestreo manual, se realiza en caso de no disponer de un muestreador automático, o cuando la muestra se toma para realizar análisis de terreno. La muestra se toma directamente en el contenedor específico. Si la muestra no puede ser tomada directamente, se debe usar un recipiente intermedio, el cual, debe estar tan limpio como el contenedor de la muestra y debe estar hecho del material adecuado para el parámetro en particular (Tabla 1).

Para la mayoría de los parámetros, es suficiente ambientar tres veces el dispositivo para muestrear, excepto para aquellas botellas que contienen preservantes.

El uso de muestreadores automáticos es más práctico, puesto que ayuda a reducir el número de errores asociados al factor humano y permite la refrigeración de la muestra durante el período de muestreo.

El equipo empleado en este estudio es el muestreador portátil SIGMA 900 (figura 4), consta de una sonda de teflón flexible por donde se aspira la muestra, la cual, es impulsada por una bomba de succión peristáltica. Un distribuidor automático se encarga de destinar la muestras en los contenedores correspondientes dentro del automuestreador minimizando así, el contacto del efluente con cuerpos extraños que pudiesen alterar la muestra. Finalmente todo el proceso es controlado por un microprocesador.

La entrada del tubo conductor de muestreo debe de preferencia enfrentar la dirección del flujo, pero puede estar en el mismo sentido de flujo en caso que se detecten obstrucciones.

El muestreador automático marca Sigma modelo 900, permite:

- Tiempos variables entre toma de muestras.
- Muestras puntuales (hasta 24 de 1 litro).
- 24 muestras compuestas hasta de un litro cada una.
- Muestras proporcionales al caudal.
- Succionar sin separación de fases en el conducto.
- Purgar el conducto de muestreo para recibir muestras frescas.
- Ambientar el conducto de muestreo con la muestra.
- Obtención de muestras compuestas en función del caudal, si se acopla a un equipo medidor de caudales ultrasónico.

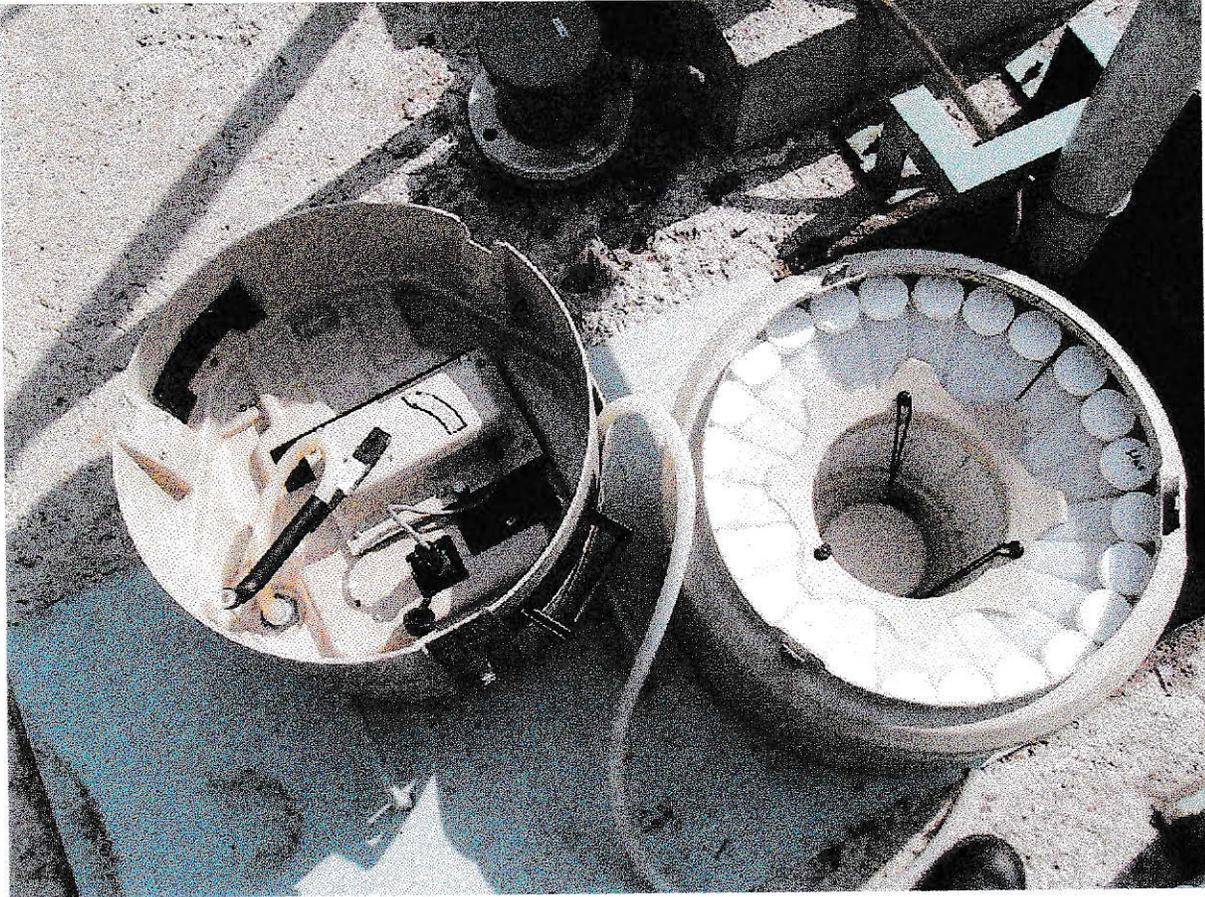
Es importante enfatizar que el peso estadístico de la varianza debida al muestreo (σ_m^2) en la varianza total es muy notable. El valor σ_m^2 suele ser de cinco a diez veces mayor que las demás varianzas mostradas en la ecuación 1. Esto demuestra la trascendencia de esta etapa y la necesidad de dedicar esfuerzos en mejorarla.

Figura N°4
Muestreador automático marca Sigma modelo 900



Figura 5

Visión interior de un muestreador automático marca Sigma modelo 900



$$\text{(ecuación 1)} \quad \sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_{\text{muestreo}} + \sigma^2_{\text{otras operaciones previas}} + \sigma^2_{\text{medida señal}} + \sigma^2_{\text{tratamiento de datos}}$$

A continuación se presentan una tabla resumen con los aspectos técnicos relativos al programa de muestreo.

Tabla N°1
Condiciones de extracción de la muestra

Parámetro	Lugar de análisis	Envase ¹	Preservación	Tiempo máximo ²	Volumen mínimo de muestra	Tipo de muestra
pH	Terreno	P ó V	—	—	—	—
Temperatura	Terreno	P ó V	—	—	—	—
Sólidos suspendidos	Laboratorio	P ó V	—	24 h	2 L de muestra natural	Compuesta
Sólidos sedimentables	De preferencia en terreno	P ó V	—	24 h	2 L de muestra natural	Compuesta
Poder espumógeno	Laboratorio	P ó V	Guardar botella hermética	24 h	2 L de muestra natural	Compuesta
DBO ₅	Laboratorio	P ó V	Llenar completamente el envase. Enfriar a 2-5 °C y almacenar en oscuridad	24 h	2 L de muestra natural	Compuesta
Coliformes fecales	Laboratorio	VE	Refrigeración	6 h	2 L de muestra natural	Puntual

Aceite y grasa	Laboratorio	V	Usar frasco boca ancha. Llevar a pH 2 con HCl y enfriar 2-5°C	28 d	1 L	Puntual
Fósforo total	Laboratorio	V ó VB	Acidificar a pH 2 con H ₂ SO ₄	1 mes	1 L	Compuesta
Nitrógeno amoniacal	Laboratorio	P ó V	Acidificar a pH 2 con H ₂ SO ₄ . Enfriar a 2-5°C y almacenar en oscuridad	28 d	1 L	Compuesta
Nitrógeno total	Laboratorio	P ó V	H ₂ SO ₄ a pH < 2	7 d	500 mL	Compuesta
SAAM	Laboratorio	P ó V	Refrigerar	48 h	250 mL	Compuesta
Triclorometano	Laboratorio	V con liner de teflón	4°C HCl a pH < 2. Agregar 1000 mg de ácido ascórbico si se presenta cloro residual	7 d	1 L	Puntual
Tetracloroetano	Laboratorio	V con liner de teflón	4°C HCl a pH < 2. Agregar 1000 mg de ácido ascórbico si se presenta cloro residual	7 d	1 L	Puntual
Nitrógeno kjeldahl	Laboratorio	P ó V	Acidificar a pH 2 con H ₂ SO ₄ . Enfriar a 2-5°C y almacenar en oscuridad	28 d	1 L	Compuesta

¹ P: Polietileno de alta densidad, sin carga, o politetrafluoretileno.

V: Vidrio.

VB: Vidrio al borosilicato.

VE: Vidrio estéril.

² Tiempo comprendido entre la toma de muestra y el análisis.

2. EXACTITUD

Otra propiedad analítica suprema imprescindible para alcanzar la calidad deseada de los resultados generados es la exactitud, que como fue mencionado en el punto anterior, su soporte lo constituyen las propiedades analíticas básicas.

Todos los métodos de análisis ambientales utilizados en este estudio están basados en referencias conocidas tales como Normas Chilenas y métodos estándares provenientes del “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. Estos métodos de análisis al ser implementados en el laboratorio han sido previamente validados, lo que implica demostrar experimental y formalmente que un PMQ realiza lo que se espera de él.

La validación es un proceso que define y asegura la calidad de la información analítica generada, lo que implica la denominada validación intrínseca, que se define como la caracterización del PMQ por medio de sus propiedades: exactitud (trazabilidad), precisión (incertidumbre), sensibilidad, selectividad, recuperación e intervalo de determinación. La validación, además garantiza la coherencia entre la información analítica generada y las necesidades informativas planteadas, para lo cual, como se comentó anteriormente es fundamental también definir aspectos como el muestreo y la conservación.

Se entiende por exactitud el grado de concordancia entre el resultado de una determinación o la media y el valor considerado como verdadero y que corresponde a la calidad referencial (MRC).

Por precisión se entiende el grado de concordancia entre un grupo de resultados obtenidos al aplicar repetitiva e independientemente el mismo método analítico a alícuotas de la misma muestra. Esta propiedad se materializa en los llamados errores aleatorios. Como se verá más adelante la precisión se analizará en sus facetas de replicabilidad y repetibilidad, como para la determinación del límite de detección.

La sensibilidad es una propiedad analítica asignable a un método (proceso) analítico que puede definirse como su capacidad para discriminar entre concentraciones semejantes de analito o su capacidad para poder detectar o determinar pequeñas concentraciones de analito

en la muestra. La sensibilidad será mayor cuanto más semejantes sean las concentraciones discriminadas o más bajas las concentraciones que pueden detectarse o determinarse.

La sensibilidad es una propiedad básica que soporta a la exactitud, la cual no puede alcanzarse si el método no tiene la capacidad discriminatoria de detección o determinación de bajas concentraciones. En este estudio se le mencionará alternativamente como sensibilidad o pendiente de la curva de calibración

La selectividad es una propiedad analítica básica atribuible a un método (proceso) analítico que se define como su capacidad para originar resultados que dependan en forma exclusiva del analito para su identificación o cuantificación en la muestra. Se materializa en las denominadas interferencias, que son perturbaciones que alteran alguna, varias o todas las etapas del proceso analítico y, por tanto, a los resultados analíticos, que se ven afectados por errores sistemáticos.

La selectividad soporta directamente a la exactitud, ya que las interferencias causan errores sistemáticos que alejan (por exceso o defecto) al resultado del valor considerado como correcto.

3. VALIDACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS

3.1 Interferente

Todo compuesto, todo elemento, toda partícula o todo factor que afecte el resultado producido por un método analítico.

3.2 Sensibilidad

La sensibilidad de un método analítico corresponde a la pendiente de la gráfica de calibración. Esta última se obtiene al graficar el valor obtenido de la señal analítica (valor absoluto, altura, área, etc.) versus las concentraciones de los estándares respectivos.

La sensibilidad permite conocer el estado de un sistema analítico y los cambios de condiciones del sistema en el tiempo.

3.3 Límite de detección

Existen distintas formas de definir los límites de detección de acuerdo a criterios estadísticos. Dentro de los que se aplican en la unidad de operaciones del CENMA se pueden mencionar.

3.3.1 Límite de detección instrumental (LDI)

Corresponde a la concentración mínima de un compuesto analizado que, sin la presencia de la matriz, un instrumento puede detectar con una fiabilidad definida y que es estadísticamente diferente de la respuesta correspondiente al ruido de fondo obtenido por el instrumento.

Procedimiento para la determinación del LDI: El límite de detección instrumental se establece agregando el compuesto de interés (estándar) en “agua pura” o el solvente adecuado de manera de obtener una concentración correspondiente a 2-10 veces el LDI estimado (literatura, catálogo del equipo, razón señal / ruido, etc.). Esta solución se somete a análisis (n replicas) en el sistema instrumental. La expresión para calcular el límite de detección instrumental requiere el cálculo de la desviación estándar (s) como se muestra a continuación:

(ecuación 2)
$$\text{LDI} = 3 \times s \quad n = 10$$

3.3.2 Límite de detección del método (LDM)

Corresponde a la concentración mínima de un compuesto que puede ser detectada dentro de una matriz real, la cual es tratada siguiendo todas las etapas del método completo, incluyendo separaciones y pretratamientos. Esta mínima concentración produce una señal detectable con una fiabilidad definida, estadísticamente diferente a la señal producto del blanco obtenido en las mismas condiciones.

Procedimiento para la determinación del LDM: Cada vez que se determine el LDM, se debe analizar una muestra real. Si la concentración del compuesto analizado se sitúa entre 2 y 10 veces la concentración del límite de detección estimado, se puede pasar a la etapa siguiente. Si por el contrario la concentración es demasiado elevada, se debe cambiar de muestra. Si la

concentración es demasiado baja, ajuste mediante la adición de un estándar la concentración del compuesto de interés para situarla entre 2 y 10 veces el límite de detección estimado.

Separe 10 alícuotas de la muestra utilizada para evaluar el LDM y realice todas las etapas implicadas en el método analítico. Para realizar los cálculos que requiere el método e informar los resultados, se debe utilizar las unidades apropiadas y el número de cifras significativas necesarias.

Si el método requiere de una solución blanco para calcular la concentración del compuesto de interés, se debe utilizar el mismo número de blancos (10) y evaluarlos en conjunto con las 10 alícuotas de muestra. La media de los blancos es sustraída de cada uno de los resultados del análisis.

A partir de los resultados obtenidos, calcular la media y la desviación estándar (s) de las replicas:

La expresión para calcular el límite de detección del método es la siguiente:

$$\text{(ecuación 3)} \quad \text{LDM} = 3 \times s \quad n = 10$$

3.4 Límite de cuantificación del método (LCM)

Corresponde a la concentración mínima de un compuesto que puede ser cuantificada dentro de una matriz real, la cual es tratada siguiendo todas las etapas del método completo, incluyendo separaciones y pretratamientos. Esta mínima concentración produce una señal cuantificable con una fiabilidad definida.

Procedimiento para la determinación del LCM: El límite de detección del método se determina siguiendo el mismo procedimiento que el usado para el LDM pero finalmente la expresión que debe considerarse es:

$$\text{(ecuación 4)} \quad \text{LCM} = 10 \times s \quad n = 10,$$

3.5 Intervalo de linealidad o de determinación

Corresponde al intervalo de concentración más fiable de medida para la determinación analítica del analito. Este intervalo está comprendido entre el LCM hasta límite de linealidad.

3.6 Precisión

3.6.1 Replicabilidad

Corresponde a un nivel de precisión asociado al grado de concordancia entre los resultados individuales obtenidos al aplicar el método en una misma muestra sometida a los ensayos realizados en el mismo laboratorio, y en las mismas condiciones siguientes: mismo analista, mismo instrumento, mismo día.

Procedimiento para calcular la replicabilidad: Dentro del intervalo de determinación del método, separe 10 alícuotas de una muestra y aplíquese el método completo, respetando las siguientes condiciones: mismo analista, mismo instrumento y mismo día. Para realizar los cálculos que requiere el método e informar los resultados, se debe utilizar las unidades apropiadas y el número de cifras significativas necesarias.

3.6.2 Repetibilidad

Corresponde a un nivel de precisión asociado al grado de concordancia entre los resultados individuales obtenidos al aplicar el método en una misma muestra sometida a los ensayos realizados en el mismo laboratorio, y al menos una de las siguientes condiciones es diferente : analista, instrumento, día.

Procedimiento para calcular la repetibilidad: Dentro del intervalo de determinación del método, separe 10 alícuotas de una muestra y aplíquese el método completo, cambiando al menos una de las siguientes condiciones: el analista, el instrumento o el día. Para realizar los cálculos que requiere el método e informar los resultados, se debe utilizar las unidades apropiadas y el número de cifras significativas necesarias.

3.6.2 Reproducibilidad

Corresponde a un nivel de precisión asociado al grado de concordancia entre los resultados individuales obtenidos al aplicar el método en una misma muestra sometida a los ensayos realizados en diferentes laboratorio, y en las siguientes condiciones: diferente analista, diferente instrumento, igual o diferente día.

Los tres términos precedentes se expresan en un intervalo de confianza a una concentración dada, en función de la desviación estándar s , a un nivel de significación especificado, para un número dado de determinaciones, ($n = 10$ réplicas).

El intervalo de confianza del 95% de la media aritmética de una serie de mediciones está definido por:

$$(ecuación 5) \quad IC(\mu)_{(1-\alpha)} = \{X - t_{\alpha/2} \cdot [s / (n)^{1/2}] \leq \mu \leq X + t_{\alpha/2} \cdot [s / (n)^{1/2}]\}$$

μ = parámetro.

α = nivel de significación de 5%.

X = promedio.

s = desviación estándar.

n = número de muestras.

$t_{\alpha/2} = 2,2622$ con 9 grados de libertad.

3.7 Exactitud

Corresponde al grado de concordancia entre el valor garantizado por un organismo reconocido (certificado), respecto la concentración de un parámetro dado en una muestra, y el resultado obtenido aplicando el método analítico en “n” replicas. La exactitud se determina a un nivel dado de concentración en el intervalo de determinación del método. Esta propiedad se expresa por el error relativo (E,%) definido por la siguiente ecuación:

(ecuación 6)
$$E [\%] = (| V_0 - V_c | / V_c) \cdot 100$$

V_c = Valor certificado.

V_0 = Media de los valores obtenidos aplicado el método.

Procedimiento para establecer la exactitud: Dentro del intervalo de determinación del método, aplicar el método analítico completo “n” veces (n = 3-10 replicas) a una muestra en la cual el parámetro a medir esté certificado por un organismo reconocido (material de referencia certificado).

3.8 Recuperación

Corresponde a la diferencia (en porcentaje) entre la concentración medida para un parámetro en una muestra fortificada (a la que se le ha agregado una cantidad conocida de estándar) y la concentración medida en la misma muestra sin fortificar, dividido por la concentración de sustancia agregada.

(ecuación 7)
$$(\%) \text{ recuperación} = [(C_s - C) / C_a] \cdot 100$$

C_s = Concentración de la muestra fortificada.

C = Concentración de la muestra no fortificada.

C_a = Concentración agregada.

Procedimiento para determinar la recuperación: Analizar una muestra real y en paralelo analizar la misma muestra a la que se ha agregado una concentración dada de estándar. La concentración final debe estar dentro del rango de determinación del método.

III. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

A continuación se presenta una ordenación de los tratamientos de aguas residuales más utilizados en el país, a partir de la cual, se desarrollará en mayor detalle aquellos sistemas de tratamiento que serán analizados en este estudio. Estos corresponden a lagunas de estabilización facultativas, lagunas aeradas facultativas, lodos activados y lechos bacterianos.

1. LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Las lagunas de estabilización presentan un amplio espectro de configuraciones dependiendo de las componentes unitarias involucradas. Las más aplicadas contemplan las siguientes configuraciones.

- Facultativas en serie y/o paralelo
- Anaeróbicas – Facultativas

En este estudio solo se analizarán plantas facultativas en serie y/o paralelo.

1.1 LAGUNAS FACULTATIVAS

1.1.1 Principio teórico

En sistemas de tratamiento en base a lagunas de estabilización facultativos, el agua residual se encuentra estratificada en tres zonas, consistentes de una capa superficial aeróbica, de una zona intermedia, y de una capa anaeróbica en el fondo (figura 6).

Los sólidos sedimentables y las células muertas experimentan en el fondo de la laguna facultativa digestión anaerobia. Estos mecanismos y reacciones de degradación se presentan a continuación.

a) Fermentación ácida (microorganismos anaeróbicos facultativos)

Hidratos de Carbono → Azúcares → Ácidos Orgánicos + Aldehídos + Alcoholes

Lípidos, grasas y Aceites → Glicerol, Ácidos Grasos →
Ácidos Orgánicos + Aldehídos + Alcoholes

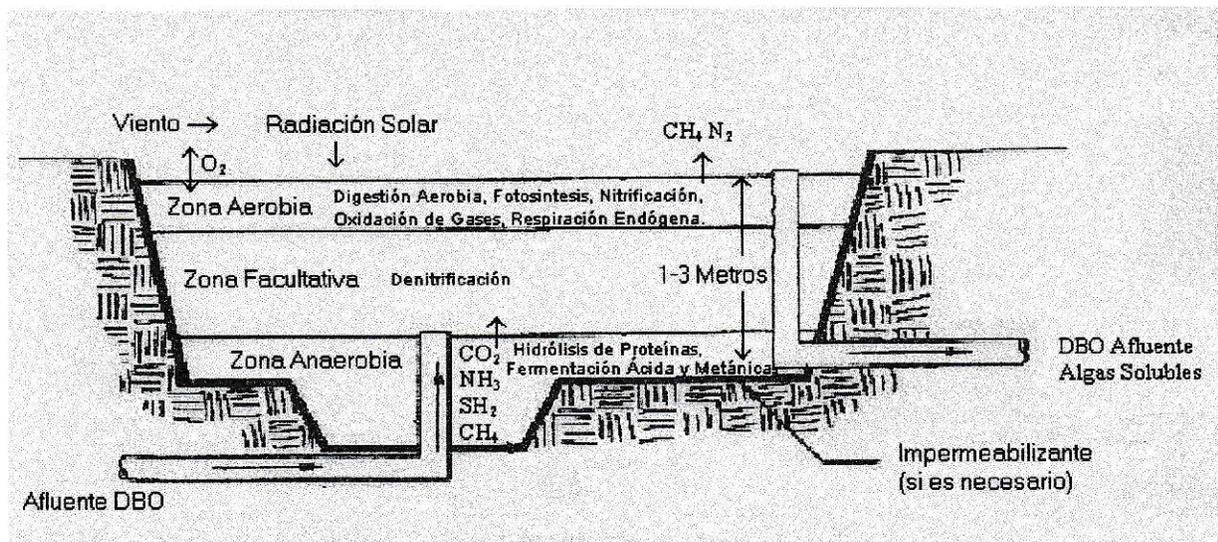
Proteínas → Aminoácidos → Mercaptanos + CO_2 + NH_3 + SH_2

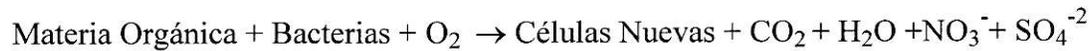
b) Fermentación Metánica (microorganismos anaeróbicos estrictos)

Ácidos Volátiles → CH_4 + CO_2

En la zona aeróbica, el oxígeno es suministrado por aeración natural, lo cual, junto con la radiación solar favorecen procesos como la digestión aeróbica, tal como muestra la siguiente expresión.

Figura N°6
Laguna de estabilización facultativa





Procesos tales como la fotosíntesis, la nitrificación, y la respiración endógena son fundamentales. A estos se suma la oxidación de gases, lo que reduce olores y a la vez proporciona tratamiento a los productos orgánicos secundarios producidos en los procesos anaeróbicos del fondo.

El oxígeno liberado por las algas es utilizado por las bacterias en la degradación aeróbica de la materia orgánica. Los productos de esta degradación (dióxido de carbono, amoníaco, fosfatos) son utilizados de nuevo por las algas, produciéndose una relación simbiótica cíclica entre las algas y las bacterias (figura 7).

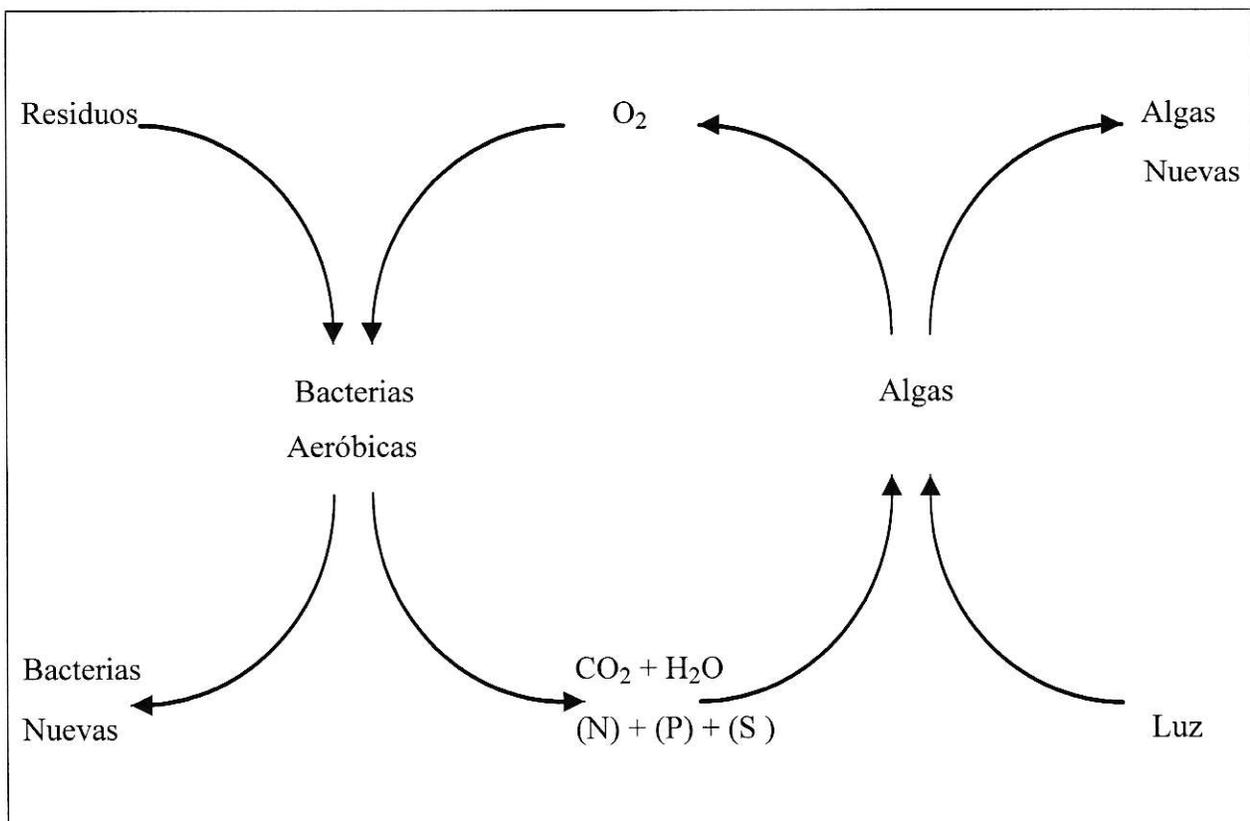
Durante el día, en presencia de la radiación solar, se produce la fotosíntesis generándose oxígeno como consecuencia de ello. Aunque parte del oxígeno producido en la fotosíntesis se utiliza en la respiración, durante el día se puede obtener una cantidad importante de oxígeno adicional, ocasionando que los valores de oxígeno disuelto excedan a los de saturación. Durante la noche no hay producción de oxígeno aunque algas y bacterias continúan utilizándolo, lo que da lugar a una disminución del oxígeno disuelto. Por otro lado, durante la noche la liberación de dióxido de carbono hace disminuir el pH. Durante el día, el amoníaco resultante de la degradación de compuestos orgánicos nitrogenados contribuye al aumento del pH. Las variaciones extremas en los valores de pH pueden llevar a condiciones adversas para las algas y los microorganismos.

1.1.2 Condiciones de operación

La factibilidad de las lagunas de estabilización depende en gran parte del costo del terreno y de que tan exigente sea la normativa en términos de calidad del efluente.

El grado de expertise requerida es mínima, debido a que está basado en condiciones naturales de depuración.

Figura N°7
Relación simbiótica cíclica entre algas y bacterias



Es recomendable la operación de al menos tres unidades en serie. El acompañamiento de unidades en paralelo puede ser usado para casos de alta tasa de carga.

La profundidad varía de 1 a 3 metros, logrando acomodar grandes deposiciones de lodos.

Para que el sistema se comporte como facultativo, se debe cumplir con que la carga orgánica aplicada sea menor a la máxima admisible (MCO), la que viene dada por la siguiente relación,

(ecuación 8)
$$MCO = 357.4 \cdot 1.085^{(T-20)}$$

$$MCO = \text{máxima carga orgánica, Kg DBO}_5 / \text{Ha.día}$$

$$T = \text{Temperatura media del agua en la laguna en el mes más frío del año, } ^\circ\text{C}.$$

La carga orgánica en términos de concentración es normalmente del orden de 100 a 300 mg DBO₅ / L.

El rango de pH varia entre 6.5 a 9.0 y la temperatura óptima del agua es de 20 °C

El tiempo de vida estimado es de 50 años.

1.1.3 Riesgos ambientales

Esta alternativa de tratamiento se ve desfavorecida, si las aguas residuales traen consigo un alto contenido de sulfatos, lo que hace que el comportamiento y eficiencia de las unidades, en especial de las componentes primarias, lleguen a ser discontinuas en el tiempo. Como consecuencia de ello, el sistema se ve propenso a la potencial generación de olores ofensivos. Se ha estimado la producción de sulfuros en función del período de retención de la laguna, la carga orgánica aplicada y el contenido de sulfatos presentes en las aguas servidas, del siguiente modo:

(ecuación 9)
$$S^{-2} = (1,058 \cdot 10^{-4} CO - 1,55 \cdot 10^{-3} PR + 5,53 \cdot 10^{-2}) \cdot SO_4^{-2}$$

CO = carga orgánica aplicada, Kg DBO₅ / Ha.día
 PR = período de retención, días
 SO₄⁻² = contenido de sulfatos en aguas servidas

Se puede apreciar claramente que la generación de sulfuros en una laguna del tipo facultativa, está altamente influida por la cantidad de oxígeno disponible. Si el contenido de oxígeno molecular en la laguna es absorbido por la carga orgánica afluyente al límite de agotarlo, entonces las bacterias empiezan a obtener el oxígeno de los compuestos oxigenados presentes en el agua como nitratos, sulfatos, etc., con la consecuente reducción de los mismos.

En ausencia de nitratos ocurre la reducción de los sulfatos, y por ser el metabolismo de las bacterias denitrificantes más rápido que el de las que reducen sulfatos, en presencia de nitratos estas últimas son desplazadas del sistema. Se debe destacar que tanto las bacterias que reducen nitratos como sulfatos, son estrictamente anaeróbicas, y compiten por el carbono orgánico presente en las lagunas.

A la luz de lo expuesto anteriormente, se puede concluir que la presencia de un elevado contenido de sulfatos en condiciones de alta carga orgánica genera inevitablemente problemas de anaerobiosis y producción de olores ofensivos, tornado al sistema particularmente sensible y de difícil control. La eficiencia está fuertemente relacionada con la profundidad del estanque, el tiempo de retención, y la temperatura.

Estos sistemas de tratamiento requieren incorporar una componente unitaria de desinfección para el abatimiento bacteriológico.

Para evitar riesgos de infiltración de aguas residuales a napas subterráneas, se recomienda la impermeabilización con caucho, plástico o arcilla

2. LAGUNAS AERADAS

Las lagunas aeradas, en que se provee oxígeno en forma artificial, surgieron como respuesta a la incapacidad de las lagunas facultativas de absorber la carga orgánica afluyente en los meses más fríos de año. Básicamente, las Lagunas Aeradas se dividen en dos tipos:

- Lagunas aeradas a mezcla completa
- Lagunas aeradas facultativas

En este estudio nos centraremos en las lagunas aeradas facultativas.

2.1 LAGUNAS AERADAS FACULTATIVAS

2.1.1 Principio teórico

El sistema de aeración suministra tanto la potencia para suplir los requerimientos de oxígeno, como la potencia necesaria para proveer mezcla completa (mantención de los sólidos suspendidos). Los sólidos se mantienen en suspensión, por lo tanto, el efluente contendrá una concentración mucho mayor que la correspondiente a lagunas facultativas y en consecuencia un elevado valor de DBO insoluble.

2.1.2 Condiciones de operación

Están diseñadas para tiempos de retención de 5 a 12 días, por lo que el espacio aumenta considerablemente comparado a lagunas aeradas a mezcla completa.

La producción de lodos es baja y con un buen grado de estabilización. El grado de expertise es mínimo, puesto que el proceso es simple y confiable.

Si se desea una mayor calidad del efluente, una disposición que resulta muy satisfactoria es una laguna aerada facultativa en la que se consume la mayor parte de la DBO soluble seguida posteriormente por una laguna de sedimentación, con el objeto tanto de acumular la DBO insoluble, como para la producción de digestión anaeróbica. La profundidad varía de 2 a 6 metros.

En cuanto a los requerimientos de oxígeno, a diferencia de las lagunas de mezcla completa, el diseño de estas unidades no está sujeto a criterios definidos, recomendándose en general, solo una densidad de mezcla de 1 a 2 W/m^3

El rango de pH recomendable varía entre 6.5 y 8.0 y la temperatura óptima del agua es de 20 °C.

El tiempo de vida estimado es de 30 años.

2.1.3 Riesgos ambientales

El lodo debe ser purgado en forma continua o semicontinua para no acumular más de lo que se dispone para dicho efecto (requisito de limpieza cada 10 ó 20 años)

Si se desea evitar la proliferación de algas en la unidad de sedimentación, el tiempo de retención de ésta (descontando el volumen ocupado por el lodo), no debe exceder de aproximadamente un día.

Este sistema presenta la necesidad de desinfectar el afluente a fin de satisfacer la calidad bacteriológica, por lo que es recomendable incorporar una componente unitaria de desinfección.

También estos sistemas son sensibles a la emisión de materiales orgánicos volátiles.

Para evitar riesgos de infiltración de aguas residuales a napas subterráneas, se recomienda la impermeabilización con caucho, plástico o arcilla dependiendo de las condiciones del suelo y las regulaciones ambientales.

Ventajas

- Proceso simple y confiable.
- Baja producción de lodos.
- Buen grado de estabilización de lodos.

Desventajas

- Requerimientos de terreno mayor a las alternativas convencionales como lodos activados.
- Altos requerimientos de energía a bajas condiciones de carga.
- Necesidad de proporcionar energía para mezcla, que puede ser mayor a la requerida para remover DBO.
- Necesidad de desinfección del efluente o lagunas facultativas posteriores.

3. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE TIPO BIOLÓGICO CONVENCIONAL

Las alternativas del tipo convencional presentan un amplio espectro de posibilidades, dentro de las cuáles, las de tecnología establecida más importantes son las siguientes:

- Cultivo suspendido aeróbico (Lodos activados)
- Cultivo fijo (Lechos bacterianos)

3.1 CULTIVO SUSPENDIDO AERÓBICO (LODOS ACTIVADOS)

3.1.1 Principio teórico

Los lodos activados consisten de una matriz gelatinosa, que incluye partículas orgánicas, inorgánicas y microorganismos capaces de utilizar la materia orgánica. Los microorganismos

presentes son bacterias unicelulares, hongos, algas, protozoos, y rotíferos. Estos flóculos están pegados por polímeros producidos por las bacterias.

La composición de microorganismos esta en función de las condiciones ambientales y de las variaciones en la composición de las aguas residuales o materia orgánica presente en el agua residual.

Flóculos regulares y densos con protozoos, indican que la biomasa es saludable. En el caso de inhibición u otro menoscabo, los protozoos mueren simultáneamente con la desagregación de los flóculos. Las bacterias filamentosas reducen la decantación y la habilidad de concentrar flóculos.

La remoción de material orgánico es ejecutada en dos grandes partes, adsorción y oxidación.

Variantes del proceso de lodos activados:

- Convencional flujo pistón
- Mezcla completa
- Aeración extendida (prolongada)
- Zanja de oxidación
- Aeración de alta carga
- Reactor discontinuo secuencial (sequencing batch reactor, SBR)

Entre las alternativas del tipo convencional, y para ordenes de magnitud relativamente medianos en términos de población equivalente, una de las versiones más ampliamente difundidas y de mayor aplicación en el tratamiento de aguas servidas domésticas y RIL la constituyen los sistemas de tratamiento por lodos activados en la versión de aeración extendida, los que presentan la ventaja de prescindir de sedimentación primaria y generar lodos altamente mineralizados, permitiendo en consecuencia su disposición como

acondicionador de suelos previo acondicionamiento en zonas de acopio sin necesidad de tratamiento posterior. Adicionalmente, el hecho de prescindir de la componente unitaria de sedimentación primaria, trae como ventaja el obviar la consecuente necesidad de efectuar tratamiento a los lodos crudos que se generen.

Existen numerosas variantes del proceso por aeración extendida, entre las que se destacan por su competitividad técnico – económica, las zanjas de oxidación, los sistemas por decantación alternada y los sequecing batch reactor o SBR. A continuación, se presentan las principales características de un proceso por zanja de oxidación, destacando que los principios que la rigen son similares a las otras versiones por aeración extendida.(figura 8)

Luego del tratamiento preliminar, las aguas residuales ingresan a una cámara de premezclado, donde se mezclan con los lodos de recirculación provenientes del sedimentador secundario, para ingresar conjuntamente al tanque de aeración, donde tiene lugar la degradación biológica por parte de la población microbiana mantenida en una concentración dada.

El efluente del tanque de aeración, es enviado al sedimentador secundario, desde donde se recolecta el agua residual clarificada para enviarla a un sistema de desinfección, donde tiene lugar el abatimiento bacteriológico, antes de ser evacuado al sistema receptor.

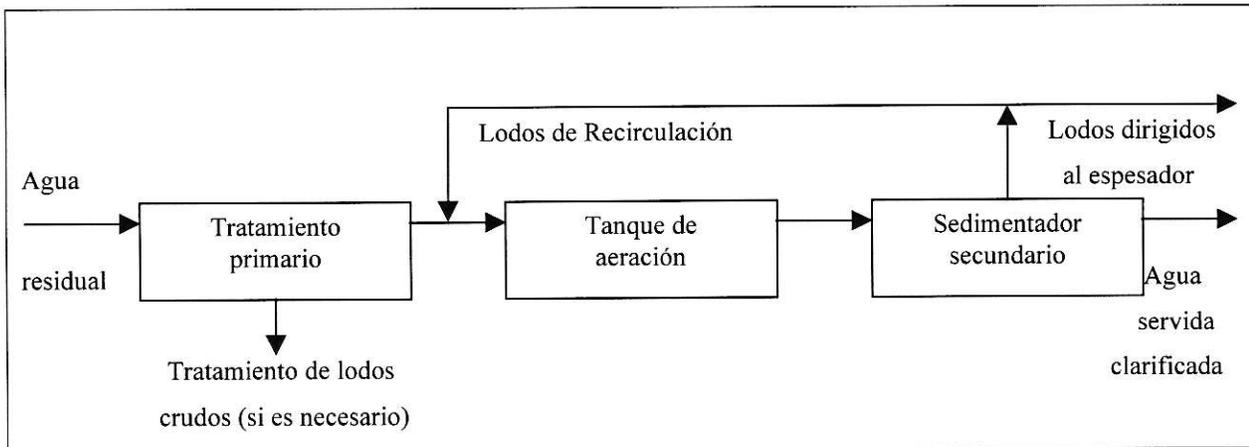
Por otro lado, parte del lodo decantado en el sedimentador es recirculado al tanque de premezclado, a objeto de mantener una proporción dada entre los microorganismos y el sustrato al interior del tanque de aeración. El resto de los lodos, son enviados a un espesador, desde donde pasan a un filtro prensa o lechos de secado, según sea el caso, donde se deshidratan hasta una humedad que permita su manipulación y disposición final.

La deshidratación de los lodos activados puede efectuarse por lechos de secado, los que si bien es cierto tienen un bajo costo de operación y mantenimiento, no lo es menos el hecho de que exigen de un gran requerimiento de área y un costo relativamente elevado en términos de obra civil y tuberías, o en su defecto sistemas mecanizados como filtros de prensa, por lo que la elección de uno u otro dependerá de cada caso en particular.

Dentro de los usos actuales o medios de eliminación que se barajan para los lodos generados se pueden mencionar a los rellenos sanitarios, la incineración, y el compostaje.

Figura N°8

Diagrama de flujo de una planta convencional de lodos activados



3.1.2 Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño de un sistema de lodos activados son la edad de los lodos (θ_c) que indica el tiempo que el lodo debe permanecer en el sistema y la relación alimento/microorganismos, conocido como F/M . La aplicación de parámetros de diseño como el tiempo de retención hidráulico no tienen sentido teórico, y los valores que se encuentran en la bibliografía son cuando mucho apropiados para aguas servidas domésticas.

Para aeración extendida y aguas servidas domésticas, la “edad del lodo” o tiempo de retención celular oscila entre 20 y 30 días, en tanto que para lodos activados convencionales, mezcla completa, contacto-estabilización y alimentación escalonada, varía entre 5 y 15 días. Se acepta que un proceso con una edad del lodo mayor a 20 – 25 días producirá un lodo mineralizado que no necesitará digestión posterior.

La razón F/M se determina dividiendo los Kg de alimento (o carga orgánica del afluente expresada en kgDBO/día) por la cantidad en Kg de sólidos suspendidos del licor mezclado en el tanque de aeración. Dicha cantidad de sólidos suspendidos se puede calcular considerando la parte volátil (SSVLM) o los totales (SSLM), siendo los volátiles un 75% aproximadamente de los totales.

$$(ecuación 10) \quad F/M = CO \text{ [kgDBO/día]} / ((SSLM \text{ o SSVLM [kg/m}^3]) \times V \text{ [m}^3])$$

CO = Carga orgánica

SSVLM = Sólidos suspendidos volátiles del licor mezclado en el tanque de aeración.

SSLM = Sólidos suspendidos del Licor mezclado en el tanque de aeración

V = Volumen del estanque

La relación entre la edad del lodo y F/M se obtiene a partir de la siguiente relación.

(ecuación 11) $\theta_c [\text{días}] = 1 / (P_x \cdot F/M)$ (con F/M en [kgDBO/ kgSSLM/día])

P_x es la cantidad de lodo en exceso que se produce en el tratamiento biológico, la que para aguas servidas domésticas oscila entre 0.6 y 1.5 kg de sólidos suspendidos totales por kg de DBO removida, según el tipo de tratamiento. Algunos valores típicos para P_x en aguas servidas son: 0.7 – 0.8 para aireación extendida; 1.2 para lodos activados convencionales y 1.5 para alta tasa. En el tratamiento de RIL, P_x podrá aumentar significativamente si existe una gran cantidad de sólidos suspendidos no biodegradables en el afluente.

Ventajas

- Flexibilidad de operación a través de un control racional de la biomasa presente en el proceso.
- Eficiencia de remoción de carga orgánica sustancialmente más alta que la que se alcanza en otros procesos como los del tipo convencional por cultivo fijo, logrando valores superiores a un 90%.
- Minimización de olores y ausencia de insectos.
- Puede incorporar desnitrificación al proceso.
- Posibilidad de regular la energía consumida para variaciones de carga orgánica.
- Prescinde de sedimentación primaria, y los lodos generados son altamente mineralizados.

Desventajas

- Control permanente, tanto operativo como de análisis de laboratorio.
- Altos costos de operación, asociados fundamentalmente a los requerimientos de oxígeno, los que se proveen en forma mecanizada.

- Bajo abatimiento bacteriológico, logrando en general abatir no más allá de un ciclo logarítmico en términos de coliformes fecales, con la consecuente necesidad de efectuar desinfección final al efluente.

3.2 CULTIVO FIJO (LECHOS BACTERIANOS)

Los lechos bacterianos son reactores de cultivo fijo, donde los microorganismos se desarrollan adheridos a un lecho o medio de soporte (el cual puede ser fijo o móvil) en forma de superficies de cultivo. El material del medio de soporte puede ser roca, madera o plástico, teniendo entre 45 y 200 m² de superficie específica por cada metro cúbico para el desarrollo de la superficie de cultivo.

El sustrato es aplicado en forma intermitente y alternada con períodos de aeración en los cuales se produce la fase de respiración de los microorganismos.

Variantes del proceso de lechos bacterianos

- Lecho móvil: Biodiscos o contactores biológicos rotatorios (CBR)
- Lecho Fijo: Biofiltros o filtros percoladores.

Los biofiltros, son estanques generalmente circulares rellenos con medio de soporte de roca o plástico, a través del cual fluye verticalmente el afluente, el que es recogido junto a la biomasa en exceso que se desprende del medio, a través de un fondo falso, desde donde pasa a la sedimentación secundaria.

Ventajas

- Estabilidad ante variaciones de la carga y concentración afluente

- Bajos costos de operación y mantenimiento.
- Producen un lodo estable concentrado, bien floculado y fácil de decantar.
- De fácil puesta en marcha luego de una detención.

Desventajas

- Baja posibilidad de incluir remoción de nutrientes en el proceso.
- Necesidad de sedimentación primaria.
- Riesgos de desarrollo de moscas *psycoda*, especialmente en climas cálidos o templados durante las estaciones de altas temperaturas.
- Requieren de un eje hidráulico de tres o más metros de desnivel.
- En las versiones de alta tasa, requieren de un gasto recirculación que hay que bombear.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. VALIDACIÓN DE MÉTODOS PARA ANÁLISIS DE AGUAS Y RILES

A continuación se presenta en la tabla 2, el resumen de las validaciones disponibles para cada proceso analítico realizado y que más adelante será desarrollado en extenso para Nitrógeno Kjeldahl.

Cabe señalar que el presente estudio se realizó durante el proceso de acreditación del laboratorio, razón por la cual, algunas validaciones de métodos no se incluyen en la tabla 2.

Tabla N°2

Resumen de validaciones efectuadas en RILES ¹

Parámetro	Exactitud (error %)	Replicabilidad (ppm)	Repetibilidad (ppm)	Pendiente curva calibración	L.D. (ppm)	Recuperación %
PH	-1	7.22 ± 0.02	—	97 (4.0-7.0) 100 (7.0-10.0)	—	—
Sólidos suspendidos totales	-17.3	18.2 ± 1.71	23.0 ± 3.38	—	5.69	105
DBO ₅	-8.6 (carbonacea) -2.3 (total)	35.4 ± 1.26	—	—	3.34	115

Aceites y grasas	14.1	74.38 ± 2.16	81.36 ± 3.20	—	10.19	99
Nitrógeno total kjeldahl. (nesslerización)	19.9	12.17 ± 0.22	91.57 ± 2.24	100.4	0.78	89
Fósforo reactivo y total ²	-10.065	1.867 ± 0.168	1.961 ± 0.248	0.122	0.703	94.47
Sustancias activas al azul de metileno ²	-19.6	0.94 ± 0.04	0.94 ± 0.05	3.36	0.08	115

¹ Tiempo comprendido entre la toma de muestra y el análisis.

² La validación fue realizada con agua potable.

2. VALIDACIÓN SISTEMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO KJELDAHL POR MÉTODO POTENCIOMÉTRICO CON DIGESTIÓN PREVIA

A continuación se detallan los términos relativos a la fiabilidad y a la validación para el método de análisis semi-micro kjeldahl descrito en el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, cuyos principios de validación son aplicables para todos los métodos realizados en la unidad de operaciones del CENMA.

2.1 EXACTITUD

Dentro del intervalo de determinación, se aplicó el método analítico completo tres veces a una muestra (material de referencia certificado) en la cual el parámetro a medir está garantizado por un organismo reconocido. En este caso la Environmental Resource Associates (ERA), certifica que el NTK expresado como N posee un valor de 9,26 mg/L con un límite de aceptación (PAL) entre 7,59 a 11,6 mg/L.

El performance acceptance limits (PAL) es una guía de aceptabilidad de resultados analíticos dadas las limitaciones de las metodologías que la USEPA usa comúnmente para determinar parámetros analíticos. El PAL se basa en la proximidad al intervalo del 95% de confianza. Su obtención se basa en datos generados por un programa interlaboratorios que involucra laboratorios de calidad semejante, que usan la misma muestra y los mismos análisis que la USEPA.

Esta propiedad como se observa en la tabla 3 es expresada por el error relativo (E,%).

Tabla N°3
Validación NTK

EXACTITUD	
Valor teórico: 9,26 ppm	
Valor obtenido [mg/L]	Promedio: 11,6 ppm Desviación estándar: 0,29 Error [%] : 25
11,4	
11,4	
11,9	

Si bien es cierto un error del 25% puede parecer un tanto alto, el resultado de la media se encuentra dentro del límite de aceptación (PAL) entregado para el MRC, por lo que el resultado se considera validado.

2.2 PRECISIÓN

2.2.1 Replicabilidad

Debido a que el análisis de 10 alícuotas no puede llevarse a cabo en un solo día, principalmente debido al cuello de botella que presentan la digestión (sólo cuatro unidades disponibles) y el destilador (sólo uno), esta propiedad analítica no pudo ser realizada.

2.2.2 Repetibilidad

Dentro del intervalo de determinación del método, se separaron 10 alícuotas de una muestra del tipo residuo industrial líquido proveniente de la industria de la celulosa y se le aplicó el método completo, variando el día de análisis. Esta propiedad se representa en la tabla 4, y se expresa con un intervalo de confianza del 95%.

Tabla N°4
Validación NTK

REPETIBILIDAD	
Valor obtenido [mg/L]	Promedio: 49,56 ppm Desviación estándar: 6,94 Repetibilidad: $\pm 4,94$
35,01	
43,01	
48,65	
50,68	
50,68	
50,70	
50,76	
51,08	
52,80	
62,19	

2.3 LÍMITE DE DETECCIÓN

Esta propiedad como se observa en la tabla 5 es expresada como LDM, definido por la ecuación 10.

Tabla N°5
Validación NTK

LÍMITE DE DETECCIÓN	
Valor obtenido [mg/L]	Promedio: 11,51 ppm Desviación estándar: 1,48 LDM: 4,43 ppm
8,9	
10,1	
10,5	
10,5	
11,6	
12,1	
12,1	
12,6	
13,1	
13,6	

2.4 SENSIBILIDAD

Los valores presentados en la tabla 6 se obtuvieron de la regresión lineal del logaritmo negativo de la concentración de amonio *versus* el potencial en mV.

Tabla N°6
Validación NTK

PENDIENTE DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN	
Valor obtenido	Promedio: -58,7
-55,31	
-56,87	
-60,15	
-62,63	

La ecuación de Nerst es dependiente de la temperatura, por lo cual se procuró realizar las curvas de calibración en una sala temperada a 25°C aproximadamente. En aquellos casos en que por razones de tiempo no se pudo esperar un intervalo de aclimatación adecuado, siempre se realizó una curva de calibración previa a la lectura de muestras.

2.5 SELECTIVIDAD (INTERFERENTES)

2.5.1 Nitrato

Durante la digestión, el nitrato sobre 10 mg/L puede oxidar al amonio proveniente de la digestión del nitrógeno orgánico, produciendo N_2O , resultando una interferencia negativa. Cuando existe suficiente materia orgánica en estado de oxidación bajo, el nitrato presente puede reducirse a amonio, resultando una interferencia positiva. Para obtener resultados más

confiables se recomienda realizar un rápido análisis Hach de nitrato (método de reducción por Cadmio).

2.5.2 Sales inorgánicas y sólidos

Los contenidos de ácido y sal del reactivo de digestión proporcionan una temperatura alrededor de 380°C. Si la muestra contiene una mayor cantidad de sales o sólidos inorgánicos que se disuelven durante la digestión, la temperatura puede elevarse sobre los 400°C, alcanzando el punto pirolítico de pérdida de nitrógeno. Para prevenir una excesiva temperatura de digestión, se debe agregar más H₂SO₄ para mantener el balance ácido-sal. No todas las sales causan la misma alza de temperatura, pero agregando 1mL de H₂SO₄/g de sal en la muestra, se alcanzan resultados razonables. Se debe añadir ácido extra y el reactivo de digestión tanto a la muestra como al blanco. Por otro lado, un exceso ácido proporcionaría una temperatura de digestión bajo 380°C resultando una digestión y recuperación incompleta. Si es necesario, se debe adicionar hidróxido de sodio-tiosulfato antes de la destilación para neutralizar el ácido. Grandes cantidades de sales o sólidos producen proyecciones durante la destilación. Si esto ocurre, se debe agregar más agua a la muestra después de la digestión.

2.5.3 Materia Orgánica

Durante la digestión el H₂SO₄ oxida la materia orgánica a CO₂ y H₂O. Si una gran cantidad de materia orgánica está presente, también una gran cantidad de ácido será consumido, la relación sal a ácido aumentará y también la temperatura de digestión alcanzando los 400°C, produciéndose una pérdida pirolítica de nitrógeno. Para prevenir esto, se debe añadir al matraz de digestión 10 mL H₂SO₄ /3 g de DQO (Para la mayoría de las sustancias orgánicas, 3 g DQO equivalen aproximadamente a 1 g de materia orgánica).

2.6 RECUPERACIÓN

Esta propiedad como se observa en la tabla 7 es expresada por el % de recuperación definido por la ecuación 14.

Tabla N°7
Validación NTK

RECUPERACIÓN			
Concentración Muestra	Concentración Estándar Adicionada	Concentración Observada	Recuperación
10,28 ppm	4,98 ppm	14,66 ppm	87,95 %
10,28 ppm	4,98 ppm	15,23 ppm	99,40 %
Recuperación Promedio:			93,68 %

La recuperación promedio se encuentra dentro del criterio de aceptabilidad de CENMA de $\pm 20\%$.

A continuación se presenta la tabla 8 que resume las propiedades analíticas de la validación NTK por método potenciométrico con digestión previa.

Tabla N°8
Resumen Validación NTK en RIL

PROPIEDAD ANALÍTICA	
Repetibilidad ¹ (mg/L)	—
Exactitud (Error %)	25
Repetibilidad (mg/L)	49,6 \pm 4,94
L.D. (mg/L)	4,43
Pendiente Curva de Calibración	-58,7
Recuperación %	93,7

¹: Esta propiedad analítica no se incluye debido a que no se pueden realizar 10 análisis en un mismo día.

3. PLANTAS DE TRATAMIENTO

De acuerdo al objetivo de muestreo, establecer la concentración de determinados contaminantes contenidos en efluentes provenientes de plantas de tratamiento, se tomó como punto de muestreo a aquel posterior a la cámara de contacto, proceso de desinfección o en ausencia de estos procesos al último tratamiento realizado antes de la descarga al cuerpo receptor. Esta información será especificada más adelante en las figuras respectivas.

Para los parámetros aceites y grasas, coliformes fecales, triclorometano, tetracloroetano se realizó muestreo puntual, puesto que el resultado es diferente si las muestras no son preservadas inmediatamente después de extraerlas, y si no se usa de una sola vez el volumen total de la muestra. Para el resto de los parámetros se realizó un muestreo compuesto dependiente del tiempo puesto que se busca determinar la conformidad con una norma basada en la calidad promedio.

El muestreo y análisis de Coliformes Fecales vertidos en aguas continentales se realizó en tres puntos. Aguas arriba del cauce receptor, en la descarga del efluente, y aguas abajo del cauce receptor. Esta medida está orientada a ampliar la visión de la calidad en que se encuentra el cauce receptor antes de la descarga (contenido natural) y a la vez también busca establecer las condiciones en que queda después de ocurrida ésta.

A continuación se presentan los resultados y discusión de las campañas de muestreo y análisis divididos en cuatro grupos, de acuerdo a las similitudes de los de tratamientos involucrados.

- PT RILES físico y químico y/o biológico
- PT AS lagunas aeradas facultativas
- PT AS lagunas facultativas en serie y/o paralelo
- PT AS tratamiento preliminar con emisario submarino

3.1 PT RILES FÍSICO Y QUÍMICOS Y/O BIOLÓGICO

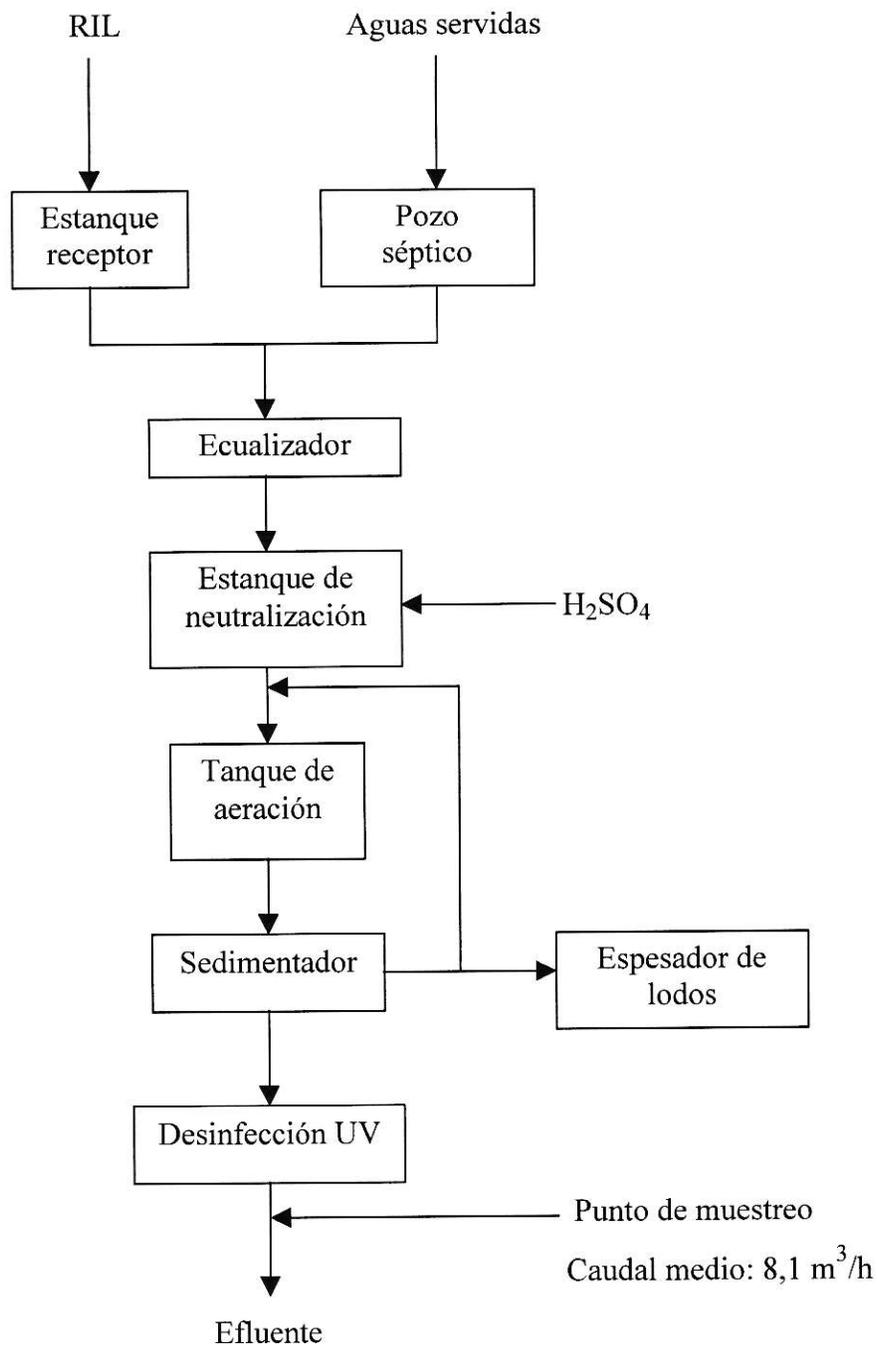
A continuación se muestran los diagramas de flujo de tres plantas de tratamiento de RILES (Tabla 9), junto con sus tablas de resultados, que exponen los valores de los parámetros analizados contrastados con las resoluciones que la SISS ha establecido como máximo. Finalmente, se presenta una discusión en base al impacto que cada parámetro introduce a nivel ecológico.

Tabla N°9
Clasificación Industrial Uniforme CIIU¹

PT	CIIU	Descripción
RIL 1	31341	Elaboración de bebidas no alcohólicas y aguas minerales gasificadas y embotellado de aguas naturales y minerales.
RIL 2	31154	Producción de harina de pescado.
RIL 3	31122	Fabricación de leche condensada, en polvo, o elaborada.

¹ CIIU : Clasificación Industrial Internacional Uniforme de las actividades económicas, Naciones Unidas

Figura N° 9
Diagrama de flujo PT RIL 1, lodos activados



(Cuerpo receptor: aguas fluviales)

Tabla N°10
Resultados calidad de efluentes PT RIL 1, Lodos activados

Parámetro	Unidades	Límite ¹	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
pH	—	5,5-9,0	6,4	6,59	6,88	6,49
Temperatura	°C	35	16,7	14,2	19,0	18,8
Sólidos suspendidos ²	mg/L	100	38	12	<5,7	30
Sólidos sedimentables	mL/L/h	20	<0,5	11	<0,5	<0,5
DBO ₅ ²	mg/L	100	9,9	7,2	77,7	6,4
Aceite y Grasa	mg/L	50	9,5	9,0	5,3	28,6
Fósforo Total ²	mg/L	1	3,150	<0,703	<0,703	4,560
Nitrógeno Total ²	mg/L	8	8,3	9,2	6,9	7,4

¹ Resolución N°945, SISS. 31 de Octubre de 1996.

² Muestreo compuesto entre 09:00 y 16:30 hrs, en forma proporcional al tiempo cada 1 h.

3.1.1 PT RIL 1, lodos activados

Esta PT trata dos tipos de afluentes puesto que tanto las descargas del proceso industrial como las aguas servidas son asimilables por el proceso de purificación. Como consecuencia de esto, la carga contaminante presenta variaciones debido a las descargas puntuales de descartes de bebidas y de aguas servidas. Es por ello que la ecualización de las líneas residuales es un punto determinante, puesto que debe componer líneas separadas atendiendo volúmenes y concentraciones.

Los parámetros analizados están en su mayoría bajo el límite establecido por la Resolución N°945, SISS. 31 de Octubre de 1996. Esto indicaría que la carga orgánica afluente del sistema de Lodos Activados no supera la condición de diseño de sus parámetros, logrando cumplir con el abatimiento de las sustancias biodegradables y también de aquellos sólidos suspendidos no-biodegradables, estos últimos, en su mayoría eliminados no como efluente sino como lodos, y por lo tanto, quedando bajo la supervisión de normativas que rigen a los residuos industriales sólidos (RISES). Relativo a esto, el decreto 90, en su punto 4.1.2 establece que, “Los sedimentos, lodos y/o sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de residuos líquidos no deben disponerse en cuerpos receptores y su disposición final debe cumplir con las normas legales vigentes en materia de residuos sólidos...”

El incumplimiento de la Resolución corresponde a los parámetros nitrógeno y fósforo total, puesto que este sistema de tratamiento no contempla la remoción de nutrientes.

Figura N° 10

Diagrama de flujo PT RIL 2, tratamientos físicos, químicos y biofiltros

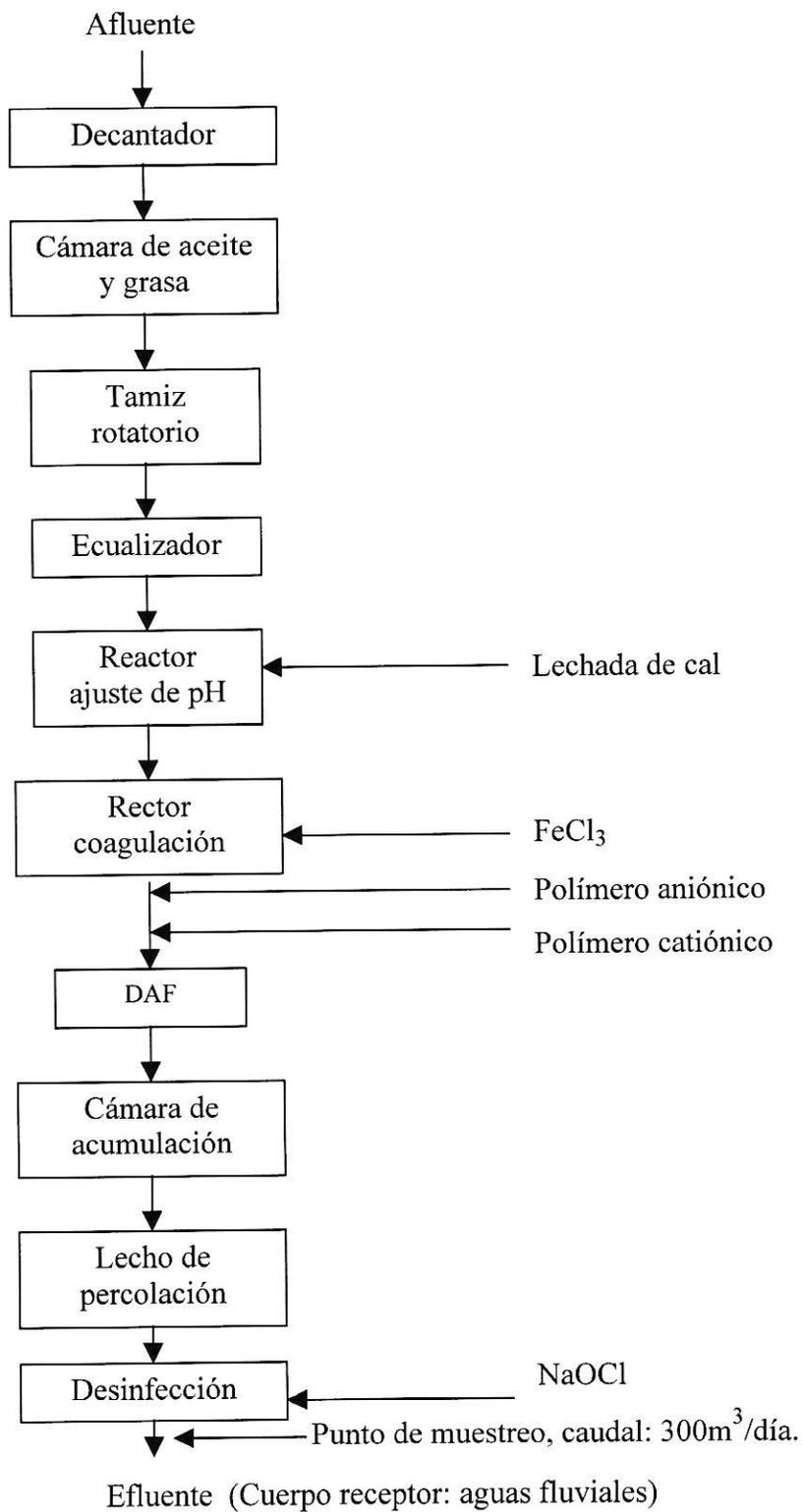


Tabla N°11

Resultados calidad de efluentes PT RIL 2, tratamientos físicos, químicos y biofiltros

Parámetro	Unidades	Límite ¹	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
pH	—	5,5-9,0	7,62	7,74	7,58	7,87
Temperatura	°C	35	14,6	12,2	18,4	14,5
Sólidos suspendidos ²	mg/L	100	38	<5,7	<5,7	<5,7
Sólidos sedimentables	mL/L/h	20	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
DBO ₅ ²	mg/L	500	400,0	67,0	177,5	70,5
Aceite y grasa	mg/L	50	18,1	5,0	6,5	28,7
Nitrógeno amoniacal ²	mg/L	10	46,4	9,0	40,0	28,8
Poder espumógeno ²	mn	7	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

¹ Resolución N°1755, SISS. 12 de Agosto de 1999.² Muestreo compuesto entre 09:00 y 16:00 hrs, en forma proporcional al tiempo cada 1 h.

3.1.2 PT RIL 2, tratamientos físicos, químicos y biofiltros

Esta industria produce elaborados de pescado, de cuyo proceso se elimina un tipo de RIL característico denominado agua de cola, el cual, involucra un conjunto de especies químicas resultantes de moléculas complejas como proteínas, aminoácidos, etc.

La PT conglomerada un heterogéneo grupo de procesos unitarios (figura 10) con el fin de abatir aquellos contaminantes de mayor relevancia para el ente fiscalizador. Es así como una cámara desengrasadora deja por debajo del límite el parámetro A y G, mientras que un decantador y un tamiz rotatorio contribuyen a la disminución de los SS y los S Sed, un reactor de pH ajusta este parámetro antes de que el RIL ingrese al reactor de coagulación, donde los SS, los materiales orgánicos y fósforo presente entre otros, forman un precipitado coloidal que se separa del líquido mediante flotación de aire disuelto (DAF). Este proceso consiste en una flotación no selectiva producida por microburbujas que se forman al reducirse la presión de flujos de agua saturados en aire a presiones elevadas. Finalmente biofiltros afinan la DBO_5 para una posterior desinfección del RIL. El resultado es PE y S Sed bajo el LD, y SS, DBO_5 y A y G bajo el límite establecido por Resolución N°1755, SISS. 12 de Agosto de 1999.

No obstante el buen funcionamiento de los tratamientos mencionados anteriormente, el nitrógeno amoniacal como se observa en la tabla 11 está por sobre el límite durante tres días de los cuatro que estableció el plan de muestreo. Esto se explica por las características del agua de cola, rica en nitrógeno. De la figura 10 se puede verificar que ninguno de los tratamientos abate este contaminante, el cual, más allá de ciertos niveles de resiliencia afecta la producción y la respiración celular a nivel de ecosistemas.

Figura N° 11

Diagrama de flujo PT RIL 3, tratamientos físicos y químicos

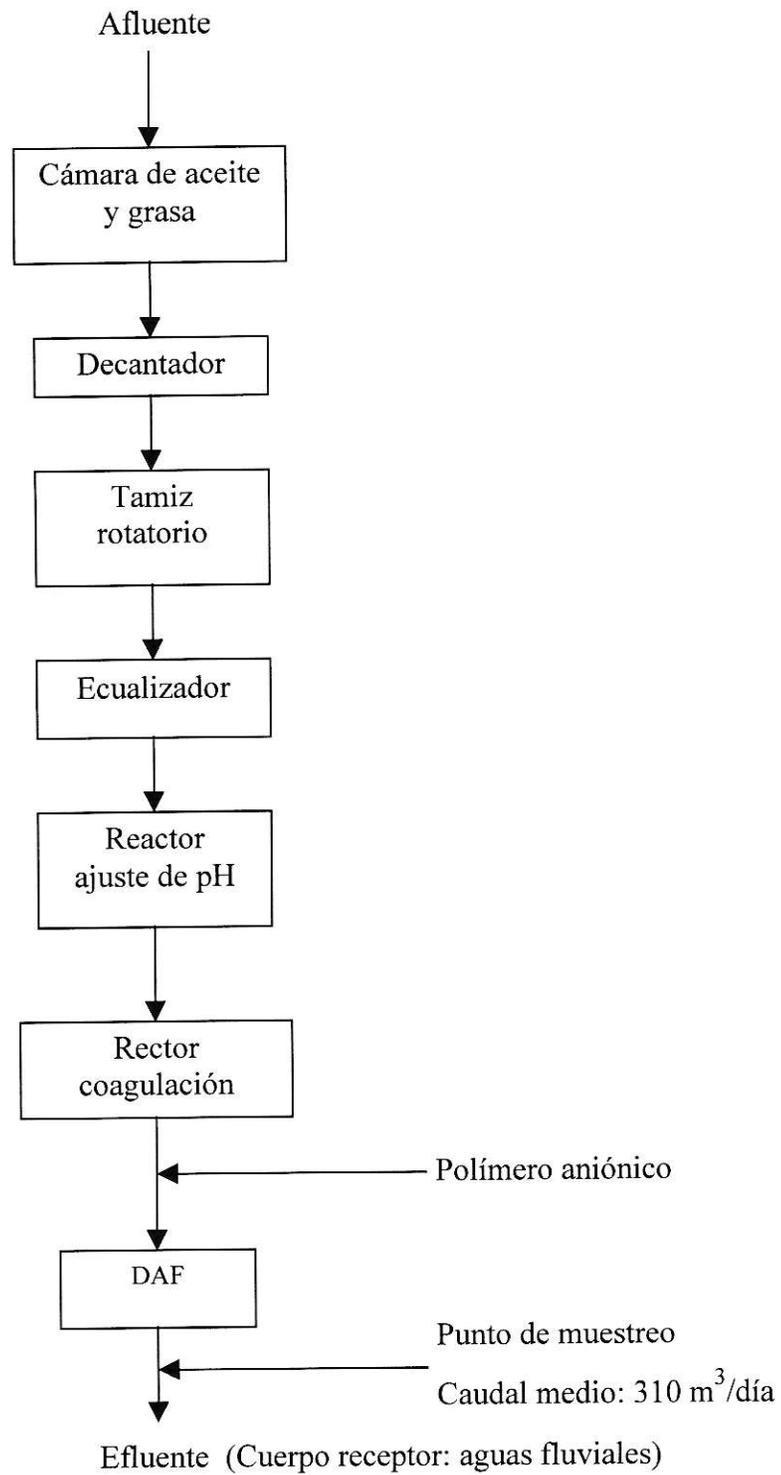


Tabla N°12

Resultados calidad de efluentes PT RIL 3, tratamientos físicos y químicos

Parámetro	Unidades	Límite ¹	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
pH	—	5,5-9,0	6,33	5,57	6,06	6,11
Temperatura	°C	35	23,4	23,5	31,4	38,3
Sólidos suspendidos ²	mg/L	100	142,0	32,0	28,0	<5,7
DBO ₅ ²	mg/L	500	227,7	235,1	77,8	282,6
Aceite y grasa	mg/L	50	20,9	7,4	11,7	11,2

¹ Resolución N°2007, SISS. 13 de Septiembre de 1999.

² muestreo compuesto en 24 h, en forma proporcional al tiempo cada 1 h.

3.1.3 PT RIL 3, tratamientos físicos y químicos

Esta industria procesa Lácteos, es por ello que los parámetros de interés en la fiscalización son básicamente orgánicos (DBO₅, A y G, y SS).

Los procesos unitarios involucrados buscan principalmente disminuir los sólidos en suspensión mediante decantadores, filtros, coagulantes y sistemas de flotación, logrando sus objetivos a excepción de los SS el día 1, sin embargo, se debe considerar que la representatividad de los valores presentados en la Tabla 12 se pueden ver seriamente comprometidos, debido a que la industria no se encontraba trabajando a su máxima capacidad, criterio definido en el programa de muestreo como fundamental para alcanzar la representatividad de la auditoría de verificación.

Por otro lado el pH es ajustado eficientemente, mientras que se evidencia un problema en el control de la temperatura el día de muestreo 4.

3.2 PT AS, LAGUNAS AERADAS FACULTATIVAS

A continuación se presentan los diagramas de flujo de cuatro plantas de tratamiento de aguas servidas domiciliarias distribuidas al interior del país, junto con la exposición de los valores de los parámetros analizados contrastados con la “Norma Técnica Provisoria SISS para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Cursos de Aguas Superficiales Continentales”. Sin embargo, se debe mencionar que el día 7 de marzo de 2001 ha sido publicado en el diario oficial el Decreto Núm. 90 que establece la “Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”, el cual, entrará en vigencia 180 días después de su publicación en el Diario Oficial. Este decreto conserva los límites ya establecidos en la Norma Técnica Provisoria SISS para residuos industriales líquidos vertidos a cuerpos de agua fluviales sin capacidad de dilución, con capacidad de dilución y cuerpos de agua lacustres.

Finalmente, en esta sección se presenta una discusión en base al impacto que cada parámetro introduce a nivel ecológico.

Figura N° 12
Diagrama de flujo PT laguna aerada facultativa 1

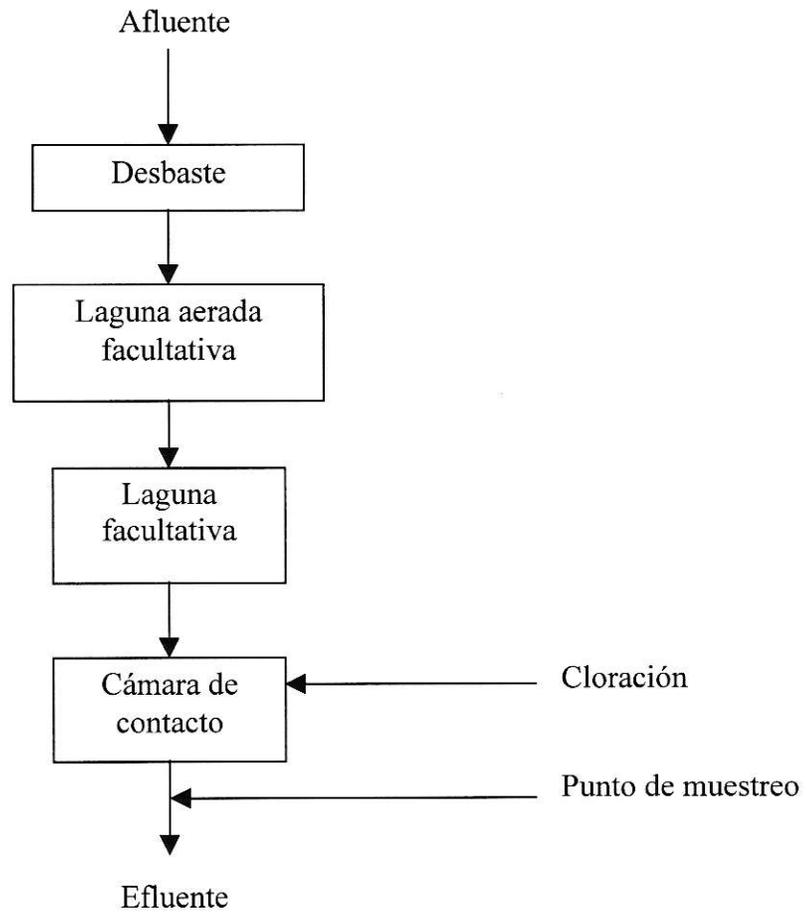


Tabla N°13

Resultados calidad de efluentes PT laguna aerada facultativa 1

Parámetro	Unidad	Límite ¹	Día 1	Día 2
Sólidos suspendidos	mg/L	80 / 300 ²	123	148
Poder espumógeno	mn	7	2,3	1,3
DBO ₅	mg/L	35 / 300 ²	102,0	98,6
Coliformes fecales ³	NMP/100	—	1.600	Ni
Coliformes fecales ⁴	NMP/100	—	<2	Ni
Coliformes fecales ⁵	NMP/100	1.000	220	Ni
Aceite y grasa	mg/L	20 / 50 ²	21,3	16,2
Fósforo total	mg/L	10 / 15 ²	4,67	19,70
Nitrógeno kjeldahl	mg/L	50 / 75 ²	67,1	66,4
Triclorometano	µg/L	200 / 500 ²	4,46	5,45
Tetracloroetano	µg/L	40 / 400 ²	<0,005	<0,005

¹ Norma Técnica Provisoria SISS para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Cursos de Aguas Superficiales Continentales.

² Límite máximo / Límite máximo considerando la capacidad de dilución del receptor

³ Punto de muestreo aguas arriba.

⁴ Punto de muestreo aguas abajo.

⁵ Punto de muestreo descarga.

Figura N° 13
Diagrama de flujo PT laguna aerada facultativa 2

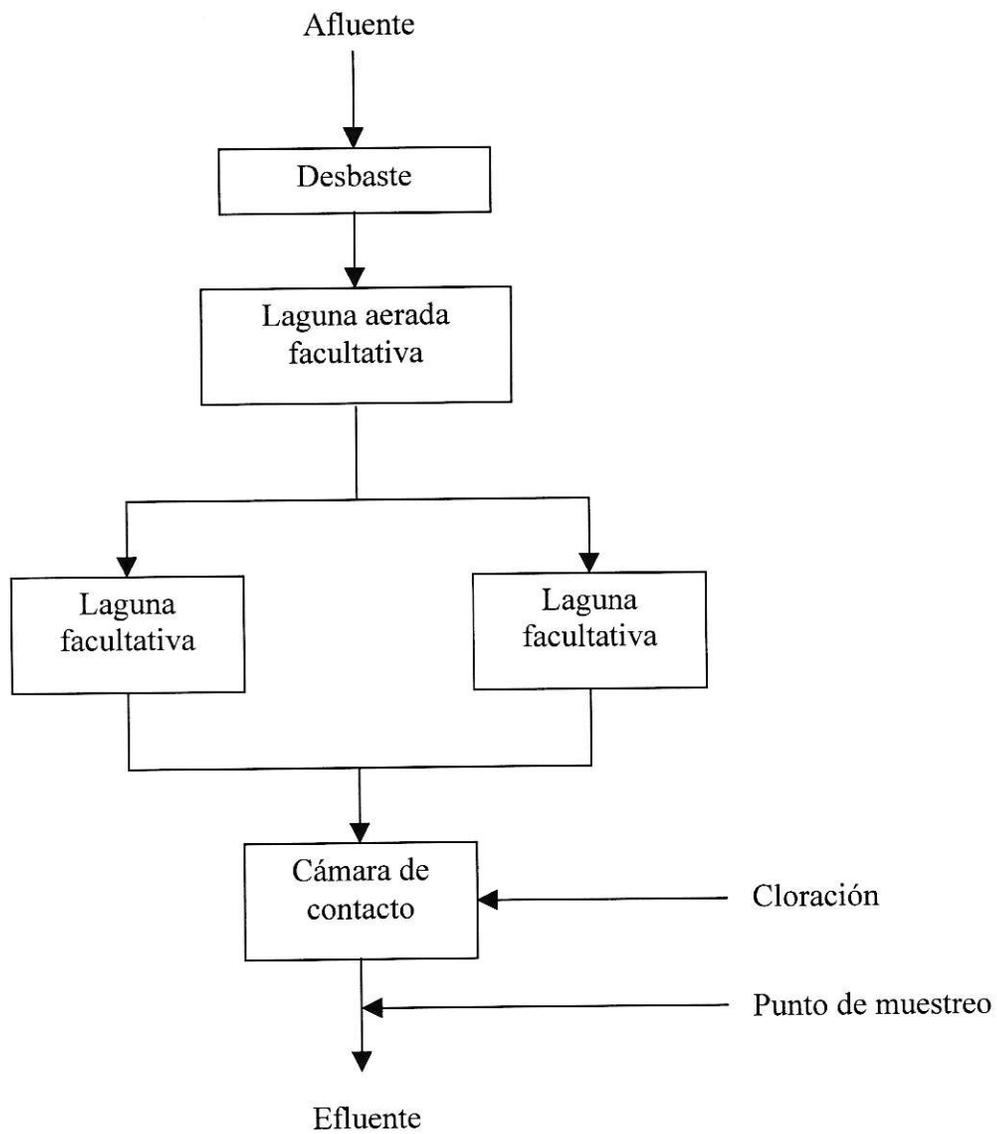


Tabla N°14
Resultados calidad de efluentes PT laguna aerada facultativa 2

Parámetro	Unidad	Límite ¹	Día 1	Día 2
Sólidos suspendidos	mg/L	80 / 300 ²	64	84
Poder espumógeno	mn	7	6,3	7,0
DBO ₅	mg/L	35 / 300 ²	138,4	175,2
Coliformes fecales ³	NMP/100	—	500	130
Coliformes fecales ⁴	NMP/100	—	500	17
Coliformes fecales ⁵	NMP/100	1.000	<2	<2
Aceite y grasa	mg/L	20 / 50 ²	50,6	53,0
Fósforo total	mg/L	10 / 15 ²	<0,017	<0,017
Nitrógeno kjeldahl	mg/L	50 / 75 ²	68,0	62,6
Triclorometano	mg/L	200 / 500 ²	17,45	9,98
Tetracloroetano	µg/L	40 / 400 ²	<0,005	<0,005

¹ Norma Técnica Provisoria SISS para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Cursos de Aguas Superficiales Continentales.

² Límite máximo / Límite máximo considerando la capacidad de dilución del receptor

³ Punto de muestreo aguas arriba.

⁴ Punto de muestreo aguas abajo.

⁵ Punto de muestreo descarga.

Figura N° 14
Diagrama de flujo PT laguna aerada facultativa 3

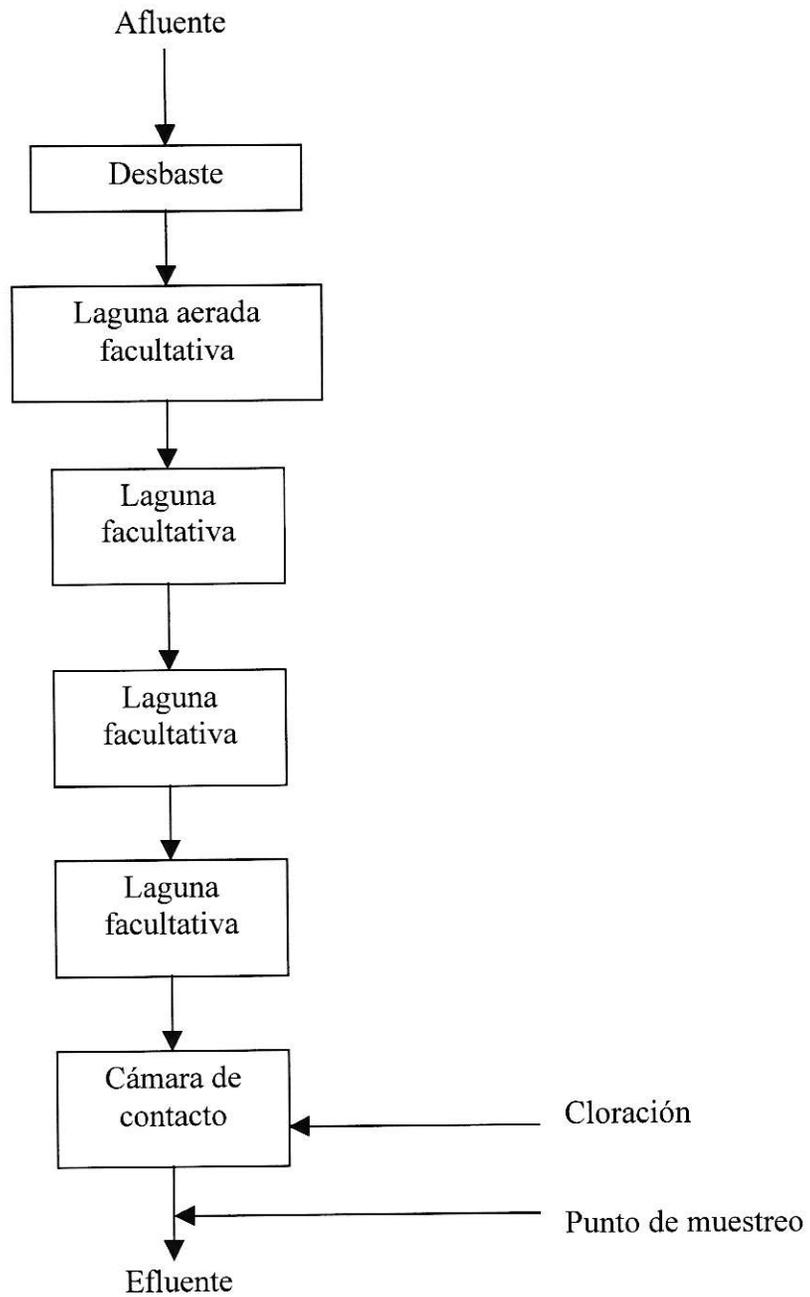


Tabla N°15

Resultados calidad de efluentes PT laguna aerada facultativa 3

Parámetro	Unidad	Límite ¹	Día 1	Día 2
Sólidos suspendidos	mg/L	80 / 300 ²	26	22
Poder espumógeno	mn	7	<0,5	<0,5
DBO ₅	mg/L	35 / 300 ²	53,5	46,9
Coliformes fecales ³	NMP/100	—	23	<2
Coliformes fecales ⁴	NMP/100	—	<2	<2
Coliformes fecales ⁵	NMP/100	1.000	<2	<2
Aceite y grasa	mg/L	20 / 50 ²	<0,91	<0,91
Fósforo total	mg/L	10 / 15 ²	13,06	16,21
Nitrógeno kjeldahl	mg/L	50 / 75 ²	34,8	46,9
Triclorometano	mg/L	200 / 500 ²	<0,057	<0,057
Tetracloroetano	µg/L	40 / 400 ²	<0,005	<0,005

¹ Norma Técnica Provisoria SISS para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Cursos de Aguas Superficiales Continentales.

² Límite máximo / Límite máximo considerando la capacidad de dilución del receptor

³ Punto de muestreo aguas arriba.

⁴ Punto de muestreo aguas abajo.

⁵ Punto de muestreo descarga.

Figura N° 15
Diagrama de flujo PT laguna aerada facultativa 4

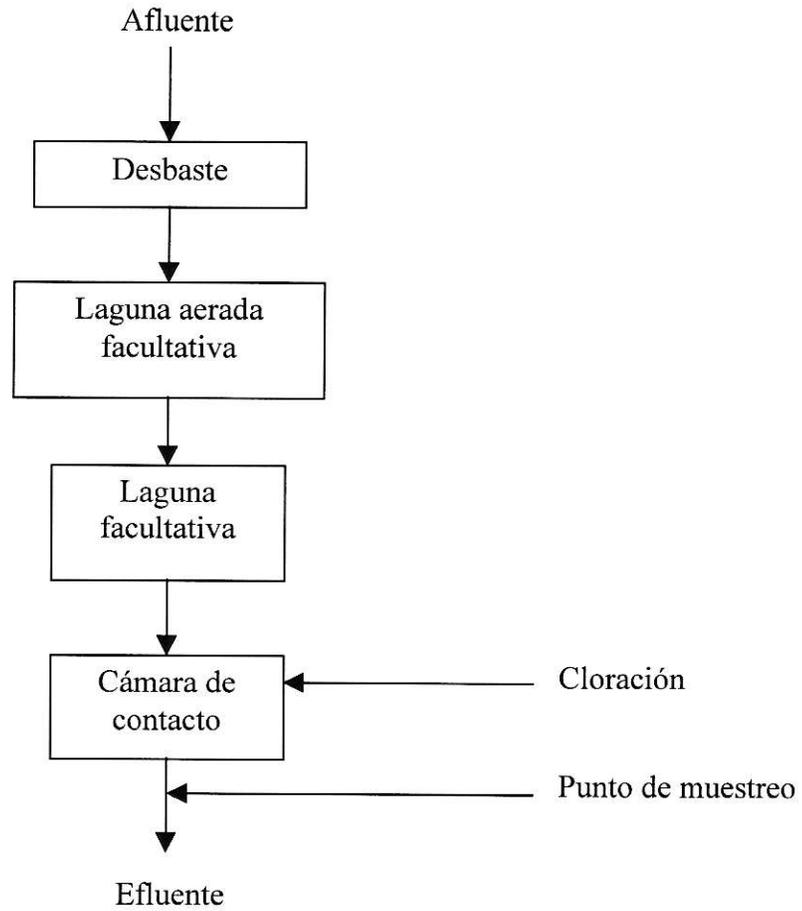


Tabla N°16

Resultados calidad de efluentes PT laguna aerada facultativa 4

Parámetro	Unidad	Límite ¹	Día 1	Día 2
Sólidos suspendidos	mg/L	80 / 300 ²	49	55
Poder espumógeno	mn	7	1,0	1,0
DBO ₅	mg/L	35 / 300 ²	40,2	46,8
Coliformes fecales ³	NMP/100	—	1.600	500
Coliformes fecales ⁴	NMP/100	—	34	23
Coliformes fecales ⁵	NMP/100	1.000	<2	<2
Aceite y grasa	mg/L	20 / 50 ²	5,8	16,4
Fósforo total	mg/L	10 / 15 ²	14,02	12,90
Nitrógeno kjeldahl	mg/L	50 / 75 ²	65,1	65,3
Triclorometano	mg/L	200 / 500 ²	<0,057	<0,057
Tetracloroetano	µg/L	40 / 400 ²	<0,005	<0,005

¹ Norma Técnica Provisoria SISS para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Cursos de Aguas Superficiales Continentales.

² Límite máximo / Límite máximo considerando la capacidad de dilución del receptor

³ Punto de muestreo aguas arriba.

⁴ Punto de muestreo aguas abajo.

⁵ Punto de muestreo descarga.

La “Norma Técnica Provisoria SISS para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Cursos de Aguas Superficiales Continentales” (y también el Decreto Núm. 90), además de establecer de acuerdo a un límite de carga contaminante quienes son consideradas fuentes emisoras, establece la concentración máxima de contaminantes permitida (Límite Máximo Permitido) para residuos líquidos descargados por los Establecimientos Industriales a los cuerpos de agua continentales superficiales. Cabe señalar que para efectos de esta norma, las Sanitarias también son consideradas establecimientos industriales, por tanto, quedan bajo su competencia.

Esta norma establece distintas exigencias de acuerdo a sí el cuerpo receptor corresponde a aguas fluviales o lacustres, presentando un especial énfasis en la diferenciación relacionada al límite nitrógeno y fósforo, siendo más estricta cuando el cuerpo receptor corresponde a un lago. Esto, debido a los procesos de eutrofización que estos nutrientes pueden generar en dichos cuerpos receptores.

En lo que respecta a este estudio, las descargas son realizadas solo sobre ríos, para lo cual la norma establece que las fuentes emisoras podrán aprovechar la capacidad de dilución del cuerpo receptor incrementando las concentraciones límites, de acuerdo al siguiente fórmula,

(ecuación 12)

$$C_i = T_{1i} \cdot (1 + d)$$

C_i = Límite máximo permitido para el contaminante i .

T_{1i} = Límite máximo permitido sin considerar dilución.

d = Tasa de dilución del efluente vertido.

No obstante, el valor C_i no puede ser superior a los límites máximos con capacidad de dilución (Límite Máximo Permisible) que dicha norma también establece. Dicho de otra forma, se considera una tasa de dilución máxima y más allá de ésta, la norma continúa constante. Esta capacidad de incrementar el límite ocurre solo para ciertos parámetros y es lo indicado en las tablas 13 a 19.

Debido a que el estudio de los caudales disponibles del cuerpo receptor escapa del alcance de este trabajo, se dará mayor énfasis al límite máximo permitido, al momento de evaluar el cumplimiento de la norma.

3.2.1 Macronutrientes, nitrógeno y fósforo

Las tablas 13, 14, 15, y 16 nos indican que estos parámetros a excepción de la PT 2 en términos de P_{total} y la PT 3 en términos de N_{total} , están por sobre el Límite Permitido (Tabla 17). Esto es de esperar debido a que la descomposición de la materia orgánica durante la fase de digestión, mediante una vigorosa aeración, desprende los nutrientes presentes en la materia orgánica, los que se suman a los ya existentes, dando como resultado, efluentes con concentraciones más altas de nutrientes inclusive a aquellos que se generarían a partir de tratamientos “primarios” que sólo consideran etapas de desbaste y lagunas de sedimentación. Esto será confirmado más adelante, en el análisis realizado para las PT Facultativas.

Tabla N°17

PT Lagunas aeradas facultativas P y N

	# de muestras P_{total} tomadas / # Muestras sobre el límite permitido	# de muestras N_{total} tomadas / # muestras sobre el límite permitido
PT 1	2 / 1	2 / 2
PT 2	2 / 0	2 / 2
PT 3	2 / 2	2 / 0
PT 4	2 / 2	2 / 2

La situación anteriormente descrita debe ser abordada con especial minuciosidad, considerando que la tendencia actual para el tratamiento de aguas domiciliarias se orienta a la transformación de lagunas facultativas a aeradas o a la implementación de PT en base a

lagunas aeradas. Este especial celo se debe principalmente a la carencia de tratamientos de abatimiento para tales nutrientes, que se presentan como rasgo característico en las empresas sanitarias a lo largo del país, corriéndose el riesgo de generar graves procesos de eutroficación en los cauces receptores.

Por otro lado, considerando que los sistemas de lagunas aeradas facultativas constituyen una alternativa de tratamiento de bajo costo, se hace difícil justificar la inclusión de sistemas de abatimiento de nutrientes, especialmente por los costos asociados que ello implicaría (Tabla 18).

Tabla N°18

Operaciones y procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para abatir P y N

Contaminante	Proceso unitario o sistema de tratamiento
Fósforo	Adición de sales de aluminio, hierro y calcio
Nitrógeno	Arrastre de amoníaco (Stripping) Intercambio catiónico Cloración en el punto crítico

Así por ejemplo, la remoción de Fósforo por adición de sales de Hierro y Aluminio, o cal requieren sistemas de homogeneización, agitación y tanques sedimentadores, para que se produzcan los procesos de precipitación, coagulación, floculación y sedimentación. Lo que conlleva un costo asociado difícil de asumir.

La situación relativa al abatimiento de nitrógeno no resulta ser muy diferente a su homólogo, puesto que para él también resulta un tanto costoso aplicar procesos como el “Stripping” o el intercambio catiónico. Una alternativa a considerar es la cloración en el punto crítico ya que resulta conveniente la existencia de sistemas de cloración que ya han sido incorporados.

En suma los tratamientos terciarios resultan ser las más efectivas metodologías de remoción de nitrógeno y fósforo desde aguas residuales domiciliarias. Sin embargo, existen alternativas

a estos costosos tratamientos que buscan aprovechar simultáneamente estas agua ricas en nutrientes como riego y fertilizantes de suelos previa desinfección, lo cual, puede resultar bastante provechoso considerando que en algunas regiones del país el agua es un recurso escaso.

Por otro lado, las sanitarias deben cumplir con los niveles de emisión que contempla la norma, de caso contrario se requerirá diseñar y construir sistemas de tratamiento de acuerdo a la factibilidad de cada uno de ellos.

3.2.2 Calidad bacteriológica, coliformes fecales o termotolerantes

Dentro de la determinación de la calidad de efluentes, el cumplimiento de la norma referida a coliformes fecales es fundamental, debido a que es un parámetro que se relaciona directamente con la salud humana.

Esto ha llevado a las plantas de tratamiento, ha incorporar sistemas de abatimiento bacteriológico. En las figuras 11, 12, 13, y 14 se observa que las componentes unitarias utilizadas corresponden a cámaras de contacto que buscan aumentar la exposición de las bacterias patógenas con el cloro libre residual (HOCl).

En las tablas 13, 14, 15, y 16 se observa que las PT en base a lagunas aeradas facultativas cumplen con la normativa relacionada a coliformes fecales. Sin embargo, cabe señalar que la búsqueda del abatimiento bacteriológico debe cautelarse, especialmente por que ésta medida puede prestarse para abusos en términos del cloro libre residual, puesto que esta especie no posee una norma que regule su concentración o uso.

3.2.3 Pesticidas, triclorometano y tetracloroetano

El triclorometano esta regulado y como se puede ver en las tablas 13, 14, 15, y 16 está muy por debajo del límite y en el caso de las PT 3 y 4 está inclusive bajo el límite detección.

El tetraclorometano no se encuentra actualmente regulado, y felizmente su análisis arroja valores por debajo del límite de detección.

3.2.4 DBO₅, sólidos suspendidos, aceites y grasas, y poder espumógeno

Indudablemente los sistemas en base a lagunas aeradas facultativas, tienen por objetivo disminuir la DBO soluble, lo cual, junto con la configuración de las unidades o lagunas facultativas posteriores buscan también aminorar la concentración de los sólidos en suspensión o DBO insoluble, por lo tanto, la justificación de la presencia de estos sistemas de tratamiento en el medio nacional estará en gran medida respaldado por el nivel de abatimiento que se alcance para estos parámetros.

La concentración de DBO₅ para las cuatro PT analizadas esta por encima del límite permitido, sin embargo, la consideración de la capacidad de dilución, le permite a la fuente emisora aumentar su límite. Esta flexibilización se debe a la capacidad de autopurificación del cuerpo receptor, esto significa, que una corriente contaminada tiende a volver a un estado similar al de antes de la contaminación, como resultado de la descomposición de la materia orgánica contaminante que dependerá del nivel de recilencia del ecosistema.

En la tabla N°25 se puede observar lo indicativo que puede resultar la concentración del parámetro DBO₅ en cuanto al sistema en estudio. Así para el caso de las PT 3 y 4, cuyos promedios de DBO₅ en 48 hrs de muestreo corresponden a 50,2 y 43,5 respectivamente, se mantiene a los parámetros SS, PE, y A y G, bajo el límite permitido. Para la PT 2, el valor promedio de DBO₅ sobre 48 hrs de muestreo corresponde a 156,8, tres veces el valor de las anteriores, además no se cumple con el límite permisible de A y G, por otra parte, un día de muestreo esta por sobre el límite permitido de los SS, y esta apenas por debajo de la norma de PE, lo cual, sugiere que el sistema esta siendo incapaz de degradar la carga orgánica que recibe. Por último la PT 1, cuyo promedio de DBO₅ sobre 48 hrs, corresponden a 100,3 presenta un problema debido a la DBO insoluble, indicándonos que la laguna facultativa posterior no posee el tiempo de retención óptimo de sedimentación ya sea para evitar la proliferación de algas o netamente proporcionar el tiempo para que sedimenten los sólidos en suspensión y se produzca su digestión.

Tabla N°19

PT Lagunas aeradas facultativas (SS, PE, DBO₅ y A y G)

	Sólidos en suspensión [ppm]		Poder espumógeno [mm]		DBO ₅ [ppm]		Aceites y grasas [ppm]	
	80		7		35		20	
Límite permitido	80		7		35		20	
PT 1	123	148	2,3	1,3	102,0	98,6	21,3	16,2
PT 2	64	84	6,3	7,0	138,4	175,2	50,6	53,0
PT 3	26	22	<LD	<LD	53,5	46,9	<LD	<LD
PT 4	49	55	1	1	40,2	46,8	5,8	16,4

Para evaluar el comportamiento de los sistemas basados en lagunas aeradas, resulta de gran ayuda contar con la información presentada en la tabla 20, y para el caso de fiscalizaciones externas a la sanitaria, el acompañamiento de estos datos junto al del monitoreo puede resultar determinante en la toma de decisiones.

Tabla N°20

Parámetros de control de lagunas aeradas facultativas

Parámetro	Unidad	Frecuencia
pH	—	Diaria
Temperatura	°C	Diaria
Oxígeno Disuelto	m/L	Diaria
Dosis Cloro Aplicada	m/L	Diaria
Consumo de Energía	KWH/día	Diaria
Profundidad del Lodo	—	Anual

3.3 PT AS LAGUNAS FACULTATIVAS EN SERIE Y/O PARALELO

A continuación se presentan los diagramas de flujo de tres plantas de tratamiento de aguas servidas domiciliarias distribuidas al interior del país, junto con la exposición de los valores de los parámetros analizados contrastados con la “Norma Técnica Provisoria SISS para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Cursos de Aguas Superficiales Continentales”. Finalmente, se presenta una discusión en base al impacto que cada parámetro introduce a nivel ecológico.

Figura N° 16
Diagrama de flujo PT lagunas facultativas 1

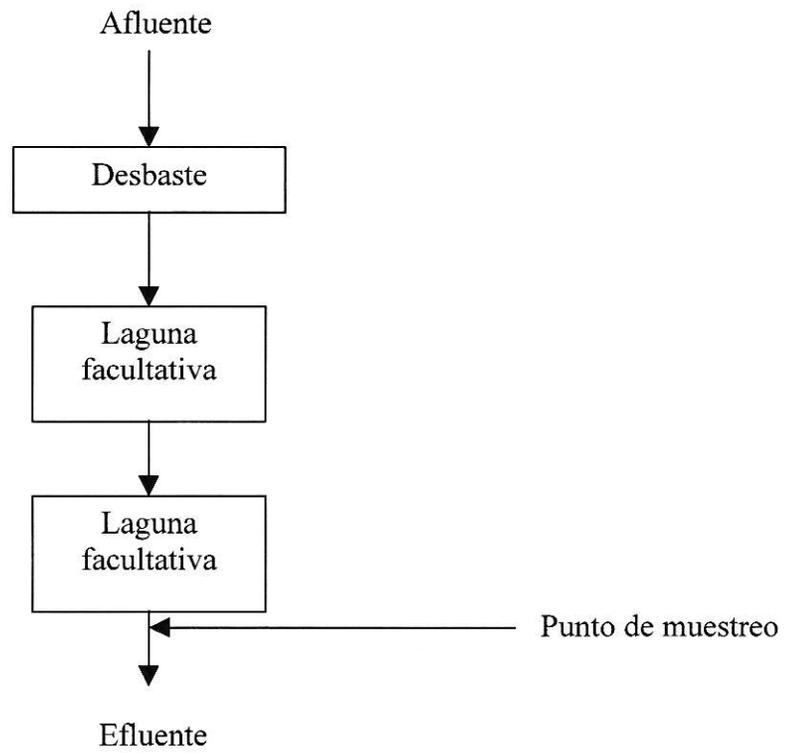


Tabla N°21
Resultados calidad de efluentes PT lagunas facultativas 1

Parámetro	Unidades	Límite ¹	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
Sólidos suspendidos	mg/L	80/300 ²	60	58	74	58
Poder Espumógeno	mn	7	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
DBO ₅	mg/L	35/300 ²	18,5	21,1	23,3	18,5
Coliformes fecales ³	NMP/100	—	23	13	220	50
Coliformes fecales ⁴	NMP/100	—	110	32	900	50
Coliformes Fecales ⁵	NMP/100	1.000	220	26	140	33
Aceite y Grasa	mg/L	20/50 ²	10,3	25,0	37,7	10,0
Fósforo Total	mg/L	10/15 ²	6,72	3,26	9,95	<0,703
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L	50/75 ²	12,1	9,7	14,2	13,5

¹ Norma Técnica Provisoria SISS para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Cursos de Aguas Superficiales Continentales.

² Límite máximo / Límite máximo considerando la capacidad de dilución del receptor

³ Punto de muestreo aguas arriba.

⁴ Punto de muestreo aguas abajo.

⁵ Punto de muestreo descarga.

Figura N° 17
Diagrama de flujo PT lagunas facultativas 2

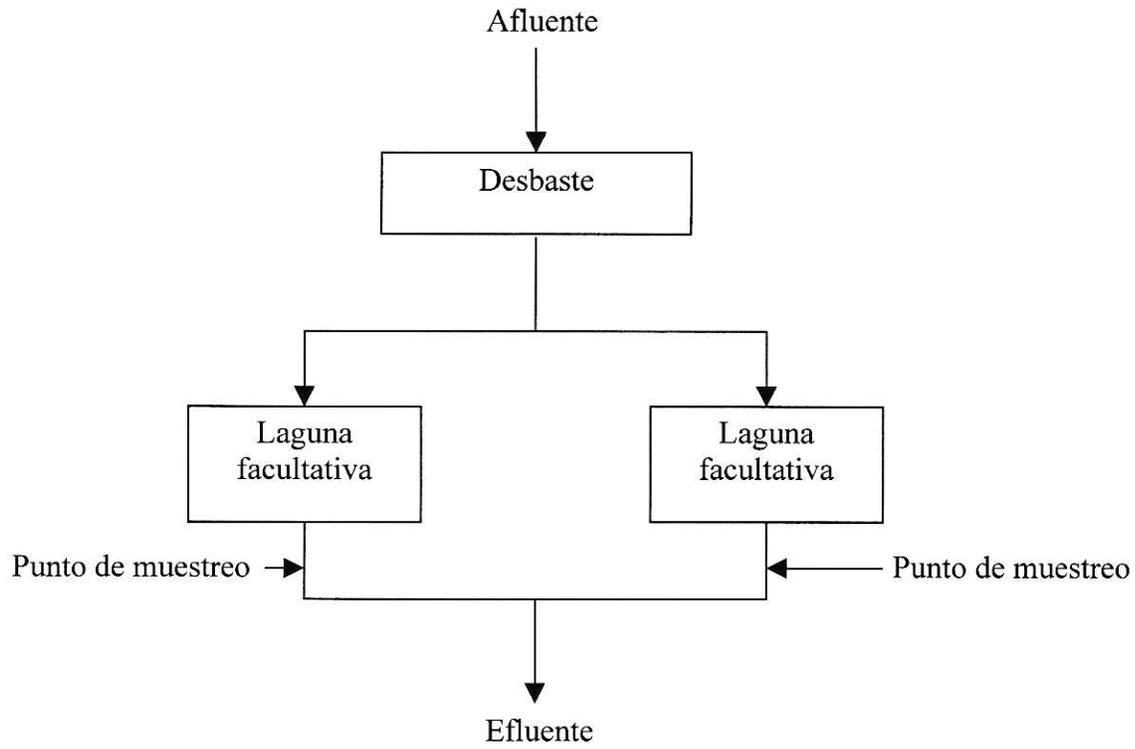


Tabla N°22
Resultados calidad de efluentes PT lagunas facultativas 2

Parámetro	Unidades	Límite ¹	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
Sólidos suspendidos	mg/L	80/300 ²	68	76	68	74
Poder Espumógeno	mn	7	2,0	1,0	1,5	1,5
DBO ₅ ²	mg/L	35/300 ²	53,0	92,9	57,7	100,0
Coliformes fecales ³	NMP/100	—	170	170	110	70
Coliformes fecales ⁴	NMP/100	—	350	5000	72	170
Coliformes fecales ⁵	NMP/100	1.000	>16.000	>16.000	>16.000	>16.000
Aceite y grasa	mg/L	20/50 ²	17,5	18,3	17,2	13,1
Fósforo total	mg/L	10/15 ²	4,66	5,43	6,76	6,07
Nitrógeno kjeldahl	mg/L	50/75 ²	32,3	31,2	32,5	33,9

¹ Norma Técnica Provisoria SISS para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Cursos de Aguas Superficiales Continentales.

² Límite máximo / Límite máximo considerando la capacidad de dilución del receptor

³ Punto de muestreo aguas arriba.

⁴ Punto de muestreo aguas abajo.

⁵ Punto de muestreo descarga.

Figura N° 18
Diagrama de flujo PT lagunas facultativas 3

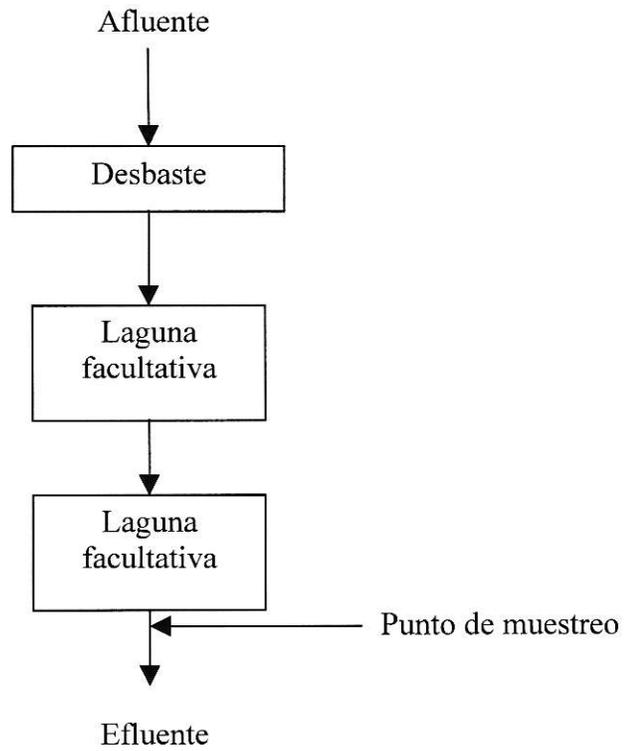


Tabla N°23
Resultados calidad de efluentes PT lagunas facultativas 3

Parámetro	Unidades	Límite ¹	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
Sólidos suspendidos	mg/L	80/300 ²	8	<5,7	<5,7	<5,7
Poder espumógeno	mn	7	1,0	1,0	1,5	1,0
DBO ₅ ²	mg/L	35/300 ²	7,6	6,2	7,3	6,8
Coliformes fecales ³	NMP/100	—	8	8	<2	23
Coliformes fecales ⁴	NMP/100	—	8	110	17	50
Coliformes fecales ⁵	NMP/100	1.000	7	33	14	70
Aceite y grasa	mg/L	20/50 ²	9,8	12,1	4,6	8,2
Fósforo total	mg/L	10/15 ²	<0,703	6,410	0,530	<0,703
Nitrógeno kjeldahl	mg/L	50/75 ²	5,7	4,4	4,4	4,1

¹ Norma Técnica Provisoria SISS para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Cursos de Aguas Superficiales Continentales.

² Límite máximo / Límite máximo considerando la capacidad de dilución del receptor

³ Punto de muestreo aguas arriba.

⁴ Punto de muestreo aguas abajo.

⁵ Punto de muestreo descarga.

3.3.1 Macronutrientes, nitrógeno y fósforo

Las PT en base a lagunas facultativas al igual que las PT en base a lagunas aeradas tampoco consideran el tratamiento de macronutrientes. Sin embargo, exhiben todos sus concentraciones correspondientes a nitrógeno y fósforo total bajo lo establecido en la norma. Esto, a pesar de que solo una muy pequeña cantidad de nutrientes afluentes disueltos pueden ser adsorbidos por los sólidos presentes para posteriormente quedar retenidos en los lodos sedimentados. Este rasgo de las PT Facultativas puede ser explicado entendiendo el menor porcentaje de materia orgánica que puede ser digerido y por tanto el menor desprendimiento de nutrientes presentes en estos materiales orgánicos.

3.3.2 Calidad bacteriológica, coliformes fecales o termotolerantes

De las figuras 16, 17, y 18, se puede observar la ausencia de componentes unitarias de abatimiento bacteriológico, esto justificado por parte de las sanitarias principalmente por las condiciones climáticas de la zona, cuyas bajas temperaturas desfavorecen la actividad bacteriológica. Sin embargo, este argumento es discutible considerando la conformidad de la norma. Los resultados de la auditoría de verificación las PT 1 y 3 cumplen con las exigencias ambientales, mientras que la PT 2 esta muy por sobre el rango de cuantificación (>16.000 NMP, tabla 22).

El cumplimiento de esta norma es especialmente prioritario, por su relación con la salud humana. Esto es distinto al caso del incumplimiento de la norma relacionada a nutrientes, que si bien es cierto, también son contaminantes ambientales, estos no afectan directamente al ser humano sino a componentes ambientales. En consecuencia, la incorporación de abatimiento bacteriológico puede ser un tema prioritario para estos sistemas de tratamiento en el caso de incumplimiento.

3.3.3 DBO₅, sólidos suspendidos, aceites y grasas, y poder espumógeno

Estos sistemas de tratamiento en particular alcanzan un buen tratamiento o remoción de estos parámetros. En el caso de la PT 1, se supera el límite permitido de A y G durante dos días de

muestreo. La PT 2 se encuentra sobre el límite permitido de DBO_5 durante los cuatro días de muestreo, pudiendo ser la razón de por que ésta PT también presenta un nivel tan alto de coliformes fecales, puesto que esta recibiendo una carga orgánica alta con su consiguiente actividad bacteriológica. Por último la PT 3 cumple con la normativa (tablas 21, 22, y 23). Para lagunas facultativas resulta una ayuda considerable para su evaluación contar con la siguiente información

Tabla N°24

Parámetros de control de lagunas facultativas

Parámetro	Unidad	Frecuencia
PH	—	Diaria
Temperatura	°C	Diaria
Oxígeno disuelto	mg/L	Diaria
Dosis cloro aplicada	mg/L	Diaria
Perfil térmico	—	Trimestral
Distribución oxígeno	—	Trimestral
Profundidad del lodo	—	Anual

3.4 EMISARIOS SUBMARINOS

A continuación se presentan los resultados del muestreo realizado a dos Emisarios, cuyos valores son contrastados con el Decreto Núm. 90 “Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”, el cual ha sido utilizado como referente durante el periodo de tramitación de dicha Norma, y entendido como un acuerdo entre las partes.

La entrada en vigencia del decreto Núm. 90 viene a terminar con un prolongado periodo de vacío legal, que impedía la fiscalización de descargas de efluentes directamente a aguas marítimas por parte de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) con un respaldo legal adecuado. Puesto que, hasta la publicación del Decreto Núm. 90 solo se contaba con un discreto Ord. N° 12.600/322 que regulaba las descargas de residuos líquidos a cuerpos de agua de jurisdicción de la DIRECTEMAR.

Los Emisarios 1 y 2 contemplan tratamiento primario para eliminar aquellos materiales de gran tamaño, mediante desbaste por rejas. En el caso del Emisario 2 también se incluye una cámara desengrasadora. Finalmente las aguas servidas son descargadas a los emisarios los cuales descartan los residuos en el mar, a una profundidad adecuada. El punto de muestreo se ubica antes de la entrada a los Emisarios.

Tabla N°25
Resultados calidad de efluentes emisario 1

Parámetro	Unidad	Límite ¹	Día 1	Día 2	Día 3
Sólidos suspendidos	mg/L	100	140	202	144
DBO ₅	mg/L	60	190	290	138
Coliformes fecales	mg/L	1.000-70 ²	>1.600	>1.600	>1.600
Aceite y grasa	NMP/100	20	46,6	74,0	46,5
SAAM	mg/L	10	14,65	9,1	6,1
Fósforo total	mg/L	5	106,7	99,2	65,33
Nitrógeno kjeldahl	mg/L	50 ³	47,9	120,0	38,1

¹ Decreto Núm. 90 “Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”.

² En áreas aptas para la acuicultura y zonas de destinación pesquera, no se deben sobrepasar los 70 NMP/100ml.

³ Valor correspondiente a Nitrógeno total.

Tabla N°26
Resultados calidad de efluentes emisario 2

Parámetro	Unidad	Límite ¹	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Sólidos suspendidos	mg/L	100	236	228	166	190	130
DBO ₅	mg/L	60	250	315	164	253	165
Coliformes fecales	mg/L	1.000-70 ²	>1.600	>1.600	>1.600	>1.600	>1.600
Aceite y grasa	NMP/100	20	62,9	84,4	41,6	46,3	45,8
SAAM	mg/L	10	2,86	7,9	4,2	6,2	6,3
Fósforo total	mg/L	5	86,6	61,4	60,9	61,0	58,96
Nitrógeno kjeldahl	mg/L	50 ³	62,9	73,1	66,0	58,1	51,8

¹ Decreto Núm. 90 “Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”.

² En áreas aptas para la acuicultura y zonas de destinación pesquera, no se deben sobrepasar los 70 NMP/100ml.

³ Valor correspondiente a Nitrógeno total.

El Decreto Núm. 90 en su punto 3.13 define la Zona de protección litoral como, “un ámbito territorial de aplicación de la presente norma que corresponde a la franja de playa, agua y fondo de mar adyacente a la costa continental o insular, delimitada por una línea superficial imaginaria, medida desde la línea baja de marea de sicigia, que se orienta paralela a esta y que se proyecta hasta el fondo del cuerpo de agua , fijada por la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante en conformidad a la siguiente formula:

(ecuación 13) $A = [(1.28 \cdot H_b) / m] \cdot 1.6$
 H_b = altura media de la rompiente [mts]
 m = pendiente del fondo
 A = ancho zona de protección de litoral [mts]”

En consecuencia, dependiendo de si el Emisario descarga dentro o no de la zona de protección litoral, habrá una normativa más restrictiva en términos de concentración y número de parámetros que cumplir a como lo sería si ésta se produce fuera de esta zona. Este punto es particularmente controversial debido a que la DIRECTEMAR solo verificará la correcta determinación de la zona de protección litoral, cuya determinación será responsabilidad de la empresa en particular. Esto conlleva un riesgo relacionado a la uniformidad de criterio en su determinación.

En este estudio en particular, compara los valores de los parámetros analizados con la norma establecida para descargas dentro de la zona de protección litoral, esto, por el interés manifestado por el organismo fiscalizador en términos de los parámetros solicitados.

Los emisarios 1 y 2, como mencionamos anteriormente poseen rejillas destinadas a retirar el material grueso del efluente, y en el caso del emisario 2 también se incluye una cámara desengrasadora, que a la luz de los valores obtenidos en este estudio no está cumpliendo sus objetivos de abatimiento.

En definitiva este sistema sanitario no trata sus efluentes, entregando esa función al cuerpo receptor que debe ser capaz de reciclar toda la carga afluente (tablas 25 y 26).

La disposición de aguas residuales en sitios específicos del océano, incluye normalmente estimaciones de la “capacidad de asimilación” del sitio de disposición para determinar la cantidad de material de desecho que puede ser recibido en esa área sin producir un impacto inaceptable para los organismos vivos y no-vivos del sistema.

El argumento para disponer aguas residuales en el océano es la capacidad de dilución por grandes volúmenes de agua o su mantenimiento en sedimentos por largos períodos de tiempo en sitios remotos para el hombre, haciendo de él un método seguro de disposición. En los casos descritos en este estudio, el vertido directo al mar ofrece ventajas económicas y

técnicas. Sin embargo, estas prácticas requieren del entendimiento de cómo es el desplazamiento de las aguas residuales después del vertido, de conocimientos de cómo las concentraciones pueden afectar a los organismos y de cuanto es el daño aceptable.

Hay evidencia de que los sistemas acuáticos difieren en su habilidad de asimilar las descargas antrópicas, por lo que se hace aún más relevante el conocimiento del comportamiento del medio receptor.

En general esta capacidad de asimilación puede ser soportada para parámetros tales como SS, DBO₅, A y G, y macronutrientes, siempre con un riesgo de eutroficación para aquellas áreas costeras con altas descargas de aguas residuales domésticas, sobre todo si se corresponde al hecho aquí aludido, descargas de aguas residuales no tratadas, que además coinciden con una presencia de coliformes fecales por sobre el límite de cuantificación, y cuya presencia es indicativo de bacterias patógenas, las cuales, suelen infectar organismos acuáticos tales como mariscos con el consiguiente peligro sobre la población. Finalmente, se debe mencionar que el único parámetro que se mantiene controlado corresponde a las sustancias activas al azul de metileno.

Por otro lado, no se debe perder de vista que en el corto plazo entrará a regir un cuerpo legal que regula la concentración de vertidos al mar y que esta siendo fuertemente superado por el contenido de macronutrientes, carga orgánica, patógenos y SS con las consecuentes perturbaciones de las variables que caracterizan el ecosistema marino.

V. CONCLUSIONES

A través de esta evaluación sistemática, documentada y objetiva se ha buscado establecer la efectividad de procesos ambientalmente críticos, de acuerdo a requerimientos legales y acuerdos formales que limitan la magnitud de las descargas al medio ambiente.

Esta evaluación y auditoría de verificación de plantas de tratamiento de aguas residuales se ha llevado a cabo ajustándose al sistema de calidad QA/QC de CENMA, el cual, busca la representatividad de las muestras y la exactitud de los resultados mediante el seguimiento de un conjunto de procedimientos y definiciones orientados a asegurar la confiabilidad de dicha información. Dentro de estos protocolos se extendió en detalle la validación de la determinación nitrógeno total por el método de kjeldahl.

En lo relativo a las plantas de tratamiento de residuos industriales líquidos se ha encontrado que la PT RIL número 1 en base a lodos activados y número 2 en base a tratamientos físicos, químicos y biofiltros, en al menos el 50% de los días de muestreo, se encontraron por sobre el límite establecido en las respectivas Resoluciones acordadas por la SISS para macronutrientes, lo cual, corrobora que un sistema de purificación que no ha incorporado en su diseño el abatimiento de nutrientes, difícilmente cumplirá con las disposiciones legales, por ello, la necesidad de implementar procesos unitarios o sistemas de purificación adecuados para alcanzar dicho objetivo. En cuanto al resto de los parámetros fiscalizados se presenta conformidad con las respectivas resoluciones.

Por otro lado, la planta de tratamiento de residuos industriales líquidos número 3 en base a tratamientos físicos y químicos, no se considera representativa, puesto que los días en que se procedió a realizar el muestreo, la industria no se encontraba trabajando a plena producción, lo cual, es un criterio fundamental y fue establecido previamente en el programa de muestreo como necesario para alcanzar la representatividad de la auditoría de verificación. Por lo tanto, cualquier discusión que se pueda desarrollar en torno a ella introduciría un sesgo a la realidad.

En lo que respecta a las lagunas aeradas facultativas, la mayor capacidad de digestión de la materia orgánica que presenta este tipo de tratamiento comparativamente con las lagunas facultativas introduce una nueva problemática a las sanitarias, en términos del desprendimiento de nitrógeno y fósforo contenido en la materia orgánica degradada, estableciendo la necesidad de un compromiso de las sanitarias para alcanzar el cumplimiento de los niveles de emisión que establece la Norma, sobre todo, considerando que la tendencia actual del país para el tratamiento de aguas domiciliarias se orienta a la transformación de lagunas facultativas a lagunas aeradas o bien a la implementación directa de PT en base a lagunas aeradas.

Específicamente, también se ha encontrado que las plantas de tratamiento en base a lagunas aeradas facultativas número 1 y 2, cuyos valores de DBO efluente están marcadamente por sobre el conjunto de valores informados para las distintas versiones de lagunajes analizados en este documento, requieren de la revisión o ajuste del número de aeradores y la potencia instalada en operación de forma urgente, para evitar desatender el objetivo de estos sistemas de tratamiento correspondiente al abatimiento de la DBO soluble junto además con la disminución de los sólidos en suspensión o DBO insoluble.

En cuanto a los tratamiento en base a lagunas de estabilización facultativos y utilizando como criterio el cumplimiento el decreto número 90, se concluye que la carga orgánica afluente no excede la carga orgánica de diseño en las plantas número 1 y 3, lo cual, repercute en la conformidad de la Norma para el resto de los parámetros relacionados y analizados en estas plantas.

Sin embargo, los valores informados de DBO efluente para la planta de tratamiento en base a laguna de estabilización facultativa número 2, presentan una no conformidad en términos de su excedencia a lo establecido en el Decreto número 90. Un segundo llamado de atención lo manifiesta la cercanía de los valores de DBO efluente al intervalo de DBO afluente que se recomienda como adecuado para tratarse en sistemas de tratamiento en base a lagunas de estabilización facultativas (100 a 300 mg DBO/L). Como consecuencia, se tiene un sistema de tratamiento ineficiente que presenta disconformidades con la legislación vigente. Para estos casos, una alternativa viable es su transformación a sistemas de tratamiento en base a lagunas aeradas. Por otro lado el tratamiento inapropiado realizado por la planta en términos de su alta

carga orgánica se correlaciona también a un alto contenido de coliformes fecales efluentes tanto en el punto de descarga como aguas abajo del cauce receptor, presentando un grave peligro de salud pública.

En general, se ha observado que las versiones de lagunaje estudiadas en enclaves pre y cordilleranos, se encuentran en la zona inmediata inferior de los poblados, básicamente por razones de costos relacionados al consumo de energía en bombeo. Esta situación, sumada al desprendimiento de sulfuros y materiales orgánicos volátiles y a los movimientos ascendentes de parcelas de aire ladera arriba, generan episodios que vulneran la calidad de vida, por tanto, en estos casos debiese mantenerse o tener en consideración un monitoreo de olores ofensivos, y para futuras instalaciones, considerarse la trascendencia de la planificación geográfica.

Finalmente, el ultimo proceso analizado corresponde a los emisarios submarinos, los cuales, no constituyen un sistema de tratamiento de aguas residuales sino más bien una forma de disposición que ofrece ventajas económicas y técnicas. Esto es confirmado por los dos casos descritos en este estudio, en los cuales, a excepción de las SAAM todos los demás parámetros fiscalizados se encuentran sobre la norma evidenciando la ausencia de tratamientos que busquen disminuir la concentración de sus efluentes, confirmando de esta forma que en los emisarios el “tratamiento” se realiza a través de la capacidad de asimilación de cuerpo receptor y no por un proceso unitario en particular sobre el afluente. En consecuencia estas prácticas requieren fundamentalmente del entendimiento de cómo es el desplazamiento de las aguas residuales después del vertido, de conocimientos de cómo las concentraciones pueden afectar a los organismos y de cuanto es el daño aceptable.

Dentro de las limitaciones de este estudio se encuentra el desconocimiento de los caudales del los cauces receptores, por tanto, la imposibilidad de determinar los límites permisibles para algunos parámetros. Por otro lado, se desconoce la zona de protección litoral, que es usada como criterio de elección de normas.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Barnes, R.S. y Mann, K.H.1991., *Fundamental of Accuatic Ecology*. Oxford: Blacwell Scientific publications

Bitton, G.1999., *Wastewater Microbiology*. Wiley-Liss, New York.

Cheremisinoff, P.N.1995., *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology*. Pp 201, 210, 241, 242, 244, 245. Marcel Dekker, New York.

Decreto Núm. 609. – Santiago, 7 de mayo de 1998. Ministerio de Obras Públicas. Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillados.

Decreto Núm. 90. – Santiago, 30 de mayo de 2000. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

Eaton, A.D. y col.1995., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Pp 4-91 – 4-95.19th edition.

Hence, M. y col.1997., *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*. Pp 117,118. Springer.

Kemmer, F.N. y McCallion, J.1990., *Manual del Agua, su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones*. Pp 6-6, 6-7, 6-9, 6-17, 6-18. Mc Graw-Hill.

NCh 2313/28, Of 98, Decreto Supremo N° 2557 de 1998 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales – Método de Análisis – Parte 28: Determinación de Nitrógeno Kjeldahl.

NCh 411/10, Of 97. Decreto Supremo N° 432 de 1997 del Ministerio de Obras Públicas: Calidad del Agua – Muestreo – Parte 10: Guía para el muestreo de aguas residuales.

Norma técnica provisoria SSIS para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a cursos de aguas superficiales continentales.

Ramalho,R.S.1993.,Tratamiento de Aguas Residuales. Pp 254, 438. Reverté.

Valcárcel, M.1999., Principios de Química Analítica. Pp 52, 179, 206, 341. Springer-Verlag Ibérica, Barcelona.