


Universidad del Bío-Bío

Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Civil y
Ambiental



“PROPUESTA PARA LA DEPURACIÓN DEL AFLUENTE DE LA LAGUNA LO MÉNDEZ”

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para
obtener el título de Ingeniero Civil.

FELIPE IGNACIO FERNÁNDEZ FUENTEALBA

Profesor Guía: Pedro Cisterna O.

Concepción, Julio del 2016

PROPUESTA PARA LA DEPURACIÓN DEL AFLUENTE DE LA LAGUNA LO MÉNDEZ

Autor: Felipe Fernández Fuentealba

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bio Bio

felferna@alumnos.ubiobio.cl

**Profesor Patrocinante: Pedro Cisterna Osorio Departamento de Ingeniería
Civil y Ambiental, Universidad del Bio Bio**

pcisterna@ubiobio.cl

RESUMEN

El presente Proyecto de Título se justifica a partir de la necesidad ambiental de mejorar la calidad de las aguas de la laguna lo Méndez, a partir de la depuración del afluente proveniente de descargas de aguas pluviales ya que éstas concentran contaminantes que exceden los valores exigidos por las normativas, que contribuye al aumento de la eutrofización sobre el cuerpo lacustre. En el camino de la consecución del objetivo de eliminar dichos contaminantes se analizan diferentes alternativas de tratamiento de aguas que resultan más interesantes de implementar, las que posteriormente se evaluaron bajo criterios, teniendo en cuenta no sólo la eficiencia en la depuración del afluente, sino que también bajo un enfoque de integración del ecosistema y su interrelación con la comunidad. De acuerdo a esto, como resultado se obtuvo que la mejor alternativa para el afluente de la laguna sea un tratamiento en base a Humedales Artificiales, ya que cumple cabalmente los aspectos evaluados, sobre todo lo que respecta a la adaptación con el entorno al medio natural. Se diseñó el Humedal Artificial subsuperficial, tomando en cuenta detalladamente los procesos biológicos que suceden en estos sistemas, logrando una significativa remoción de la DBO, Nitrógeno, Fósforo y Sólidos Suspendidos. Además se desviaron los afluentes pluviales que descargan directamente a la laguna para el ingreso al humedal, lo que hace posible el tratamiento del agua de la laguna y le da permanencia a la operación del Humedal Artificial.

Palabras claves: Remoción de contaminante, sistema de depuración, Humedal Artificial.

ABSTRACT

This research came up from an environmental necessity of improving the water quality of the lake called lo Méndez. This could be possible through the water purification coming from rainwater because of its pollution level exceeds the rates demanded by regulation which contributes to increase the eutrophication over the lake. For getting the purpose of eliminating the pollutants, several interesting water treatment alternatives were analysed. These alternatives were evaluated under certain conditions, considering not only the efficiency for tributary purification but also ecosystem integration and its community interrelationship.

According to the analysis, the more suitable option is the wetland based sewage treatment, mainly due to its good adaptation to environment. The subsurface constructed wetland was designed considering in detail the biological processes involving this kind of systems to adjust the values for achieving a higher treatment efficacy by getting a significant reduction of BOD, Nitrogen, Phosphorus and Suspended Solids.

It was also designed a system through mechanical lifting equipment which gets to direct some of the lagoon water to the wetland system, that makes possible treatment to the lagoon water and gives permanence to the wetland system operation

Keywords: eliminating the pollutants, water treatment, wetland system.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Problema Investigativo.....	1
1.3 Alcances.....	2
1.4 Objetivo General.....	3
1.5 Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Estudio de Antecedentes	4
2.1.2 <i>Diagnóstico de la calidad ambiental de la laguna lo Méndez y propuesta de recuperación urbana</i>	4
2.2 Aguas Residuales	6
2.2.1 <i>Aguas Lluvias</i>	6
2.3 Alternativas de tratamiento	8
2.3.1 <i>Tratamiento por lagunaje</i>	8
2.3.2 <i>Filtros Percoladores</i>	9
2.3.3 <i>Biodiscos</i>	10
2.3.4 <i>Humedales Artificiales</i>	11
2.4 Normativas y Regulaciones.....	14
2.4.1 <i>D.S. N° 90 del 2000: “Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales”</i>	14
CAPITULO III: METODOLOGÍA.....	15
3.1 Estudio de Antecedentes	15
3.1.1 <i>Estudios anteriores</i>	15

	5
3.1.2	<i>Características de aguas residuales</i> 15
3.1.3	<i>Alternativas de tratamiento</i> 15
3.2	Evaluación de las Alternativas de Tratamiento..... 15
3.2.1	<i>Criterios de Selección</i> 15
3.2.2	<i>Matriz de Selección de Selección</i> 16
3.2.3	<i>Descripción de la línea de tratamiento</i> 16
3.3	Caracterización de la Zona en Estudio..... 16
3.3.1	<i>Zona geográfica</i> 16
3.3.2	<i>Hidrología</i> 16
3.4	Propuesta de Mejoramiento..... 17
3.4.1	<i>Modelo Matemático</i> 17
3.4.2	<i>Diseño del Sistema de Tratamiento</i> 17
3.4.3	<i>Diseño Obras Complementarias</i> 17
CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL TEMA..... 18	
4.1	Evaluación de cada alternativa..... 18
4.1.1	<i>Criterios de Selección</i> 18
4.1.2	<i>Priorización de los criterios</i> 19
4.1.3	<i>Selección del Sistema de tratamiento</i> 19
4.1.4	<i>Descripción de la línea de tratamiento</i> 21
4.2	Hidrología 21
4.3	Propuesta de Mejoramiento..... 23
4.3.1	<i>Ecuaciones de Diseño de un Humedal Artificial Subsuperficial</i> 23
4.3.2	<i>Diseño del Humedal Artificial</i> 26
4.3.3	<i>Diseño de Obras complementarias</i> 32

	1
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	35
5.1 Conclusiones	35
5.2 Recomendaciones.....	36
CAPITULO VI: BIBLIOGRAFÍA.....	38

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de las Entradas y Salidas de Flujos de Aguas en la Laguna	5
Tabla 2:Resumen Concentración Media por Evento Observadas	7
Tabla 3 : Parámetros de Depuración de los Humedales	12
Tabla 4: Requisitos Permitidos Para Descargar a Cuerpos Lacustres	14
Tabla 5: Prioridad de Cada Criterio.....	19
Tabla 6: Matriz Final de Selección de Alternativas Evaluadas	20
Tabla 7: Caudales de Crecidas en la Red de Colectores.....	23
Tabla 8: Coeficientes de temperatura y constantes de reacción para 20°C	25
Tabla 9: Verificación de colectores Proyectados	32

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Ubicación de las entradas y salidas de flujos de aguas en la laguna.....	4
Figura 2: Esquema con la solución propuesta	5
Figura 3: Tratamiento por lagunajes.	8
Figura 4: Sección típica de un filtro percolador.	10
Figura 5: Bódisco	10
Figura 6: Humedales artificiales.....	11
Figura 7: Remoción de la DBO en el Sistema.....	28
Figura 8: Nitrificación en el sistema.....	29
Figura 9: Desnitrificación en el sistema	30
Figura 10: Remoción del Nitrógeno total	30
Figura 11: Remoción del Fósforo.....	31

Figura 12: Remoción de de los sólidos suspendidos	31
Figura 13 : Punto de Funcionamiento de Sistema	33

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

El lugar lógico para la evacuación de las aguas residuales de una comunidad es un cuerpo natural de agua. Esta forma de desagüe, denominada evacuación por dilución, ha sido empleada por muchos municipios, con poco o ningún tratamiento. El proceso natural denominado autodepuración ha evitado problemas en muchos casos, pero la industrialización y la demografía urbana siempre crecientes, acompañadas de un retraso en el tratamiento, han llevado a una contaminación severa de las aguas (Vásquez *et al*, 2003).

La producción de aguas residuales es una consecuencia necesaria e inevitable de las actividades humanas, éstas pueden repercutir de manera muy negativa en la calidad de las aguas de los cuerpos receptores y en particular de las lagunas y lagos, aumentando el deterioro ambiental y paisajístico de la laguna. Es por esto que es primordial salvaguardar estos bienes ambientales, poniendo énfasis en un mayor control sobre estos recursos, utilizando nuevas tecnologías de tratamiento de aguas, constituyendo un proceso fundamental en la preservación de estos recursos, debido a que de esta forma se disminuyen considerablemente los problemas sanitarios y potenciales daños al ecosistema y con ello se logra una recuperación del recurso para ciertos usos y la mejora de calidad de vida para la ciudad.

La ciudad de Concepción se ha caracterizado históricamente por poseer un rico patrimonio ambiental, disponiendo dentro de su radio urbano una gran dotación de cuerpos de agua, entre ellos 5 lagunas: laguna redonda, lo Galindo, lo Méndez, lo Custodio y Tres Pascualas. A lo largo de décadas, estas lagunas han sufrido la contaminación y degradación de su frágil ecosistema por la acción del hombre, debido al poco cuidado de la comunidad aledaña a éstas y de las descargas de aguas residuales, tanto de aguas lluvias como de aguas servidas, lo que deja de manifiesto la falta de ordenamiento urbano y medioambiental.

1.2 Problema Investigativo

La Laguna lo Méndez es un lugar de recreación para las personas que viven en las poblaciones cercanas, ya que cuenta con numerosas áreas verdes y juegos infantiles. Sin embargo, hoy en día las aguas de esta laguna se encuentran con una calidad dañada, no sólo producto de la basura existente en las riberas y en el cuerpo de agua, sino que principalmente debido a las descargas de aguas lluvias ya que éstas poseen gran carga contaminante, producto del lavado desde la superficie urbana provocado por la precipitación y escorrentía superficial. Además del aporte por el lavado superficial urbano, existen descargas múltiples de colectores de aguas lluvia, los cuales realizan un aporte equivalente a

1.3 Alcances

Este trabajo tiene por objetivo principal mejorar la calidad de las aguas de la laguna lo Méndez a través de la depuración del afluente que descarga directamente hacia el cuerpo lacustre, de modo que éstas cumplan con los requerimientos y exigencias de las normativas ambientales, de esta forma generar un creciente interés por estas áreas, recuperando el uso de esta laguna para actividades recreativas, así otorgar una mejora en la calidad de vida de los habitantes. Para ello, se identificaron los factores relevantes que influyen en el proceso de eutrofización de la laguna. Además, se analizó los posibles sistemas de tratamiento de agua para poder ser instalado, como lo son las lagunas de estabilización, humedales artificiales, filtros percoladores y biodiscos los que fueron evaluados en base a criterios técnicos, medio ambientales y sociales, con el fin seleccionar el más adecuado de acuerdo al entorno y a las necesidades de la zona en estudio para tratar el afluente que llega a la laguna y de esta manera poder disminuir o mitigar el grado de contaminación.

1.4 Objetivo General

- Proponer una propuesta para la depuración del afluente de la laguna lo Méndez.

1.5 Objetivos Específicos

- Analizar los factores relevantes que influyen en el proceso de contaminación de la laguna.
- Evaluar alternativas de tratamiento de aguas, tanto no convencionales como convencionales.
- Seleccionar el sistema de tratamiento más adecuado para el afluente, de acuerdo a criterios técnicos, medio ambientales y sociales.
- Diseñar un sistema de depuración para el afluente y establecer recomendaciones para su correcto funcionamiento y mantenimiento.

CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se detalla de manera breve los estudios realizados hasta la actualidad en la presente laguna. Además, se determinan conceptos teóricos donde se definen los factores importantes que influyen en el proceso de eutroficación de la laguna lo Méndez y también las principales alternativas de tratamiento de agua tanto convencional como no convencional, las cuales se analizarán en profundidad.

2.1 Estudio de Antecedentes

A continuación se describen algunos estudios realizados en la laguna que servirán de base para este Proyecto de Título.

2.1.2 Diagnóstico de la calidad ambiental de la laguna lo Méndez y propuesta de recuperación urbana

Proyecto de Título presentado en obtener el Título de Ingeniero Civil en la Universidad del Bío- Bío (Peña, 2015); se determinó la calidad ambiental de la laguna en relación a su nivel trófico, de manera que se realizó una propuesta de recuperación que permita el uso recreacional acuático, la proliferación de peces, pero principalmente el mejoramiento de las aguas de tal manera que se cumplan las normativas explicadas posteriormente en este proyecto.

Cabe destacar que el trabajo mencionado anteriormente sirvió de base para realizar este proyecto de título, por lo que es necesario mencionar algunos aspectos.

a) Afluentes encontrados

Se encontraron 6 fuentes puntuales de aguas lluvias, donde las primeras 2 corresponden a descargas por colectores de aguas lluvia y las restantes corresponden a canales de regadíos presentes en la zona. Se visualizó también, una descarga que es vertida por la laguna Lo Mendez hacia la laguna Lo Galindo (Figura 1).



Figura 1 : Ubicación de las entradas y salidas de flujos de aguas en la laguna

La descripción de cada uno de estos puntos se muestra en la Tabla 1 donde se precisa además la ubicación en coordenadas geográficas UTM Datum WGS84 18H.

Tabla 1 Descripción de las Entradas y Salidas de Flujos de Aguas en la Laguna

ID	Sentido de Descarga	Descripción	Coordenadas UTM WGS84 18H	
			E (m)	S (m)
LME1	Entrada	Aguas Lluvia	673813.00	5925531.00
LME2	Entrada	Aguas Lluvia	67385.89	5925550.75
LME3	Entrada	Aguas Lluvia	673895.64	5925541.62
LME4	Entrada	Aguas Lluvia	673956.92	5925496.02
LME5	Entrada	Aguas Lluvia	674006.30	5925311.78
LME6	Entrada	Aguas Lluvia	673671.00	5925418.00
LMS	Salida	Salida de Aguas de la Laguna	674013.03	5925315.22

Fuente: (Peña, 2015)

b) Propuesta de Mejoramiento

Para mejorar la calidad de aguas lluvias, se propuso recolectar las aguas vertidas por los colectores de LME1 y LME3 hacia el terreno valdío al oeste de la laguna, para luego tratarla con un sistema de tratamiento que permita depurar el agua lluvia y así mitigar los contaminantes que presenta ésta (Figura 2).

2.1 Aguas Residuales

Se llama agua residual a los líquidos que proceden de la actividad humana que llevan en su composición gran parte de agua y que generalmente son vertidos a cursos o a masas de agua continentales o marinas (Seoáñez, 1999).

Dentro de las aguas residuales se encuentran: las aguas domésticas o urbanas; aguas residuales industriales; aguas de usos agrícolas; aguas pluviales.

Principalmente la mayoría de las aguas residuales provienen del uso doméstico e industrial, no obstante, las aguas pluviales urbanas están tomando una importancia fundamental, debido al arrastre de contaminantes producto del lavado desde la superficie urbana que representa las principales causantes del deterioro y la mala calidad de los recursos hídricos, fenómeno conocido como Eutrofización (ver más detalle sobre la eutrofización Anexo A1).

Para esta investigación en cuestión, fueron las aguas pluviales las predominantes en el área de estudio, ya que los afluentes estudiados corresponden a este tipo de agua residual.

2.2.1 Aguas Lluvias

El fenómeno de la contaminación de las aguas de lluvia se viene estudiando desde hace poco mas de 30 años. Se ha demostrado con el tiempo que los contaminantes presentes en la escorrentía superficial afectan negativamente al medio ambiente y en esta caso el cuerpo lacustre en cuestión.

El agua de la descarga de la precipitación pluvial está menos contaminada que las aguas residuales domésticas, razón por la cual recibe poco o ningún tratamiento antes de su descarga en colectores de agua lluvia. El desagüe de agua pluvial, en particular en las ciudades, contiene aceite, grasas, polvo y otros particulados procedentes de caminos, hojas de árboles, así como precipitación de contaminantes del aire y materia orgánica, siendo las primeras precipitaciones que generan mayor concentración de contaminantes en las aguas lluvias provenientes, producto del lavado superficial de las calles (Henry, 1999).

El agua lluvia absorbe los gases y vapores que se encuentran normalmente en la atmósfera, los cuales podemos encontrar: oxígeno, nitrógeno, bióxido de carbono, ácido sulfhídrico, metano y otros gases desechados a la atmósfera principalmente por la consunción de combustibles (Fair et al, 1968). Se puede agregar que el grado de contaminación de las aguas lluvias depende de diversos factores relacionados a los hábitos de la población, contaminación de la ciudad, frecuencia con que son limpiadas las calles, además de la longitud de los periodos secos y de las características de la precipitación, es por esto que estos factores hacen que el grado de contaminación sea variable en el tiempo, siendo un parámetro difícil de determinar. Diversos estudios han tratado de encontrar relaciones entre las variaciones en la concentración de diferentes contaminantes y los factores presentes en la cuenca. Entre estos se pueden contar: el tamaño de la cuenca, el uso del suelo, la densidad del tráfico, la orientación del viento, y factores dependientes de la precipitación como la intensidad, duración, magnitud (volumen de agua precipitada) y duración del período seco entre dos eventos consecutivo (Fernández A. , 2009).

En el año 2003 se presentó la primera investigación en el país realizada acerca de la calidad de las aguas lluvias urbanas (Montt et al, 2003). El estudio mide concentraciones instantáneas y concentraciones medias de una serie de contaminantes, que pudieran estar presentes en las aguas lluvias que escurren por la superficie hurbana. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Resumen Concentración Media por Evento Observadas

Concentración de Contaminantes en Agua Lluvias							
Grupo	Parámetro (mg/L)	N° de eventos medidos	Promedio (mg/L)	Coef. De Variación	Mínimo (mg/L)	Mediana (mg/L)	Máximo (mg/L)
Inorgánicos	Amoniaco	36	1,21	0,95	0,19	0,6	4,11
	Nitrato	36	3,96	3	<0,5	11,3	71,07
	Nitrito	36	<0,1	0	<0,1	<0,1	<0,1
Demanda de Oxígeno	DBO5	36	63	1,1	3	4,44	301
	DQO	36	143	1,22	10	11,24	905
Sólidos	Sól. Suspendidos	36	504	0,8	27	442,1	1976
	Sól. Disuelto	36	156	0,69	10	113,3	557

Sin embargo, aun no existe una normativa que defina estándares de carga contaminante concretos para este tipo de agua residual. En países en vías de desarrollo la contaminación provocada por las aguas pluviales no ha sido abordada ni menos normada, básicamente por centrarse en los problemas más urgentes de tratamiento de aguas como los son las descargas de aguas industriales y servidas.

2.3 Alternativas de tratamiento

El objetivo principal de ubicar una planta de tratamiento de aguas consiste en eliminar o disminuir la concentración de los contaminantes traídos por las aguas lluvias que descargan en la laguna que son perjudiciales para el entorno acuático y terrestre de ésta.

En términos generales, dentro de las alternativas de tratamiento, existen procesos fisicoquímicos y procesos biológicos. Los procesos biológicos utilizan microorganismos que se alimentan de la materia orgánica contaminante y con ello la eliminan del agua en forma de nuevas células o de gases. A su vez, los tratamientos biológicos se pueden distinguir en tratamientos biológicos del tipo convencional y tratamientos de tipo no convencional.

Los sistemas de tratamiento de tipo no convencional difieren de las convencionales, debido a que éstas no utilizan un equipo de aireación, pero requieren extensas áreas de terreno. En cambio las alternativas de tratamiento del tipo convencional incluyen mecanización de los sistemas, pero utilizan menores extensiones de terreno.

A continuación se detallan 5 tipos de alternativas las que se evaluarán a partir de su funcionamiento biológico y sus características técnicas.

2.3.1 Tratamiento por lagunaje

Los sistemas de lagunaje (Figura 3) consisten en embalses construidos a una profundidad variable que favorece la acción de microorganismos tales como bacterias, protozoos, algas, etc. y necesitan una gran superficie de terreno, reteniendo el agua residual el tiempo suficiente para que se lleve a cabo el proceso de purificación natural, proporcionando así el grado de tratamiento necesario.



Figura 3: Tratamiento por lagunajes.

a) Funcionamiento del proceso

Estos se pueden clasificar en 4 tipos según la presencia de oxígeno en: aerobia, de maduración, facultativas y anaerobia. La depuración del agua residual se produce a través de un proceso natural, donde están involucrados la utilización de algas y de bacterias.

La materia orgánica es descompuesta por las bacterias, formando nitrógeno inorgánico, NH_3 , fosfatos, PO_4 y dióxido de carbono, CO_2 . Estos compuestos liberados en este proceso de degradación son empleados por las algas ayudado de la luz solar para la fotosíntesis, liberando el oxígeno que a la vez son consumidos por las bacterias, cerrando así el ciclo. En la Figura 4 se puede ver la interacción entre algas y bacterias.

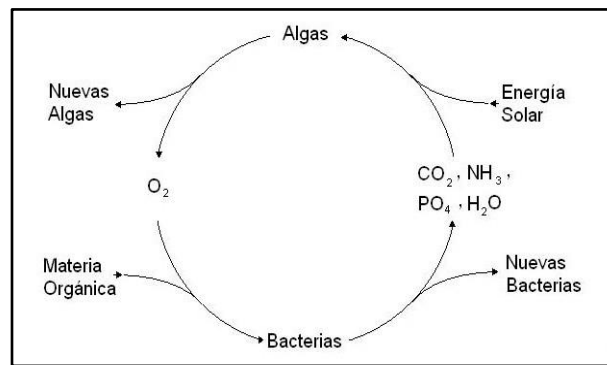


Figura 4: Relación simbiótica en laguna de estabilización aerobia

Fuente: (Eddy,1996)

2.3.2 Filtros Percoladores

El filtro percolador consiste en un relleno cubierto de limo biológico por medio del cual el agua residual es percolada. Su estructura está formada por lechos que van de 1 a 12 m de profundidad, entre los que se pueden encontrar los rellenos de roca, clinker o materiales sintéticos (nombres comerciales: Surfpac, Flocor, Actifil). Sin embargo, existen ciertas características que diferencian a estos tipos de lechos, por ejemplo, los lechos rellenos de roca, clinkers u otros materiales similares no pueden sobrepasar profundidades de 1 a 2,5 m; mientras que los lechos de materiales sintéticos pueden soportar profundidades entre 6 y 12 m (Ramalho, 1996).

a) Funcionamiento

El agua residual afluyente percola a través del relleno poniéndose en contacto con la capa de limo biológico. Los filtros percoladores poseen dos propiedades fundamentales: la superficie específica, constituida por los m² de superficie de relleno por m³ de volumen total, y el porcentaje de huecos. Cuanto mayor sea la superficie específica mayor será la cantidad de limo biológico por unidad de volumen.

El proceso que el agua residual experimenta en el filtro percolador se desarrolla mediante un distribuidor rotativo que permite que el agua se distribuya en forma de pulverización uniforme sobre el lecho de relleno. El agua residual percola de manera descendente a través del relleno y el efluente se recoge en el fondo. A continuación se puede observar un diagrama de la sección típica de un filtro percolador (Figura 5).



Figura 5: Sección típica de un filtro percolador

2.3.1 Biodiscos

Los bódiscos y biocilindros se integran dentro de los procesos biológicos convencionales, el proceso es válido como elemento reductor de la materia orgánica, como elemento de nitrificación y elemento de desnitrificación. El agua residual comienza a distribuirse, generando una biomasa que se encuentra fija en la superficie de discos, los cuales están dispuestos en serie, girando a una baja velocidad (1,5 rpm) y sumergiéndose parcialmente en el agua un 40% (Ramalho, 1996). En la Figura 6 se muestra una sección típica de estos sistemas.

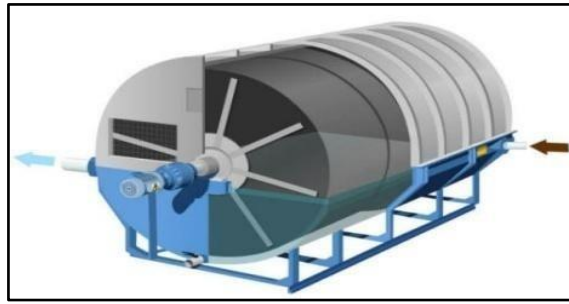


Figura 6: Bío-disco

a) Funcionamiento

El agua pasa horizontalmente a través del tanque donde están ubicados los discos, de modo que al girar a baja velocidad, dichos elementos quedan expuestos de forma aleatoria al aire y al agua a tratar y comienza a desarrollarse una película biológica sobre sus superficies. De esta manera, el crecimiento biológico aumenta hasta alcanzar un espesor de 0,2 a 3,0 mm. Por efecto de los procesos biológicos, ya estudiados, y de la velocidad del agua durante la rotación, ocurre el desprendimiento de capas de la película, pasando a flóculos en suspensión en el líquido. Estos flóculos se separan posteriormente por sedimentación en el siguiente paso del tratamiento y en cuanto se realiza la separación, comienza de inmediato un nuevo biocrecimiento de la película o biofilm.

2.3.2 *Humedales Artificiales*

Los humedales artificiales (Figura 7) son sistemas de tratamiento poco profundos (0,6-0,9m) permanentemente inundados por aguas superficiales o subterráneas, en esta área se desarrolla un ecosistema compuesto por suelo, agua, vegetación, microorganismos e invertebrados acuáticos.



Figura 7: Humedales artificiales

a) Funcionamiento.

Los humedales eliminan contaminantes mediante varios procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización (Stearman, 2003).

Las plantas son las encargadas de la remoción biológica de los contaminantes, éstas captan fácilmente los distintos contaminantes que traen las aguas residuales, ya que poseen gran concentración de nutrientes esenciales para las plantas, tales como el nitrato, amonio y fosfato, además éstas son capaces de acumular metales tóxicos como cadmio y plomo. Las bacterias crecen a través de las raíces y tallos en la columna de agua, que además es el medio de filtración y adsorción de sólidos. A su vez, los tallos y hojas que se encuentran sobre la superficie disminuyen la intensidad de la luz del sol con lo que impide la formación y crecimiento de las algas, reducen los efectos del viento en el agua, es decir, la transferencia de gases entre la atmósfera y el agua, además transfieren los gases para y desde las partes sumergidas de la planta (Llagas, 2006).

Los humedales artificiales se clasifican en dos tipos según el tipo de flujo: Sistema de flujo Libre (FWS) y Sistemas de flujo Subsuperficial (SFS).

a.1) Sistema de flujo Libre (FWS)

Por lo general en este sistema se le aplica agua residual pretratada, la profundidad del agua es normalmente baja (0,1 - 0,6 m), en donde el flujo de agua es permanentemente superficial y las plantas acuáticas están enraizadas en el fondo del humedal. El agua residual es vertida en un extremo del lecho, circulando a través de las hojas y tallos de las plantas, escurriendo sobre la superficie a una baja velocidad y horizontalmente para ser descargada en el otro extremo del lecho(Arias & Brix, 2003).

a.2) Sistema de Subsuperficial (FS)

Estos tipos de humedales está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado (EPA, Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo subsuperficial, 2000). En este tipo de humedal el flujo de agua no es visible, circula por debajo de la superficie a través de un medio granular de arena, grava o suelo y entre las raíces de las plantas. En el fondo del lecho el agua es recolectada y se evacúa por medio de tuberías. Un sistema de flujo subsuperficial requiere una menor área que los humedales de flujo libre, ya que las áreas superficiales para la absorción, filtración y los biofilms son mucho más altas y reducen los insectos y los problemas del olor, puesto que las aguas residuales permanecen debajo de la superficie de la grava.

b) Eficiencia

La eficiencia en el tratamiento por Humedales Artificiales se define en la Tabla 3.

Tabla 3 : Parámetros de Depuración de los Humedales

Parámetros	Eliminación (%)
Sólidos en Suspensión	85 – 95
DBO5	85 – 95
DQO	80 – 90
N	35– 50
P	20 – 35

Fuente: (Alianza por el Agua, 2008)

c) Ventajas y desventajas

Ventajas y desventajas de los humedales artificiales

Ventajas:

- Simplicidad en la operación. Requieren un tiempo bajo de operarios y pocos equipos electromecánicos.
- Pueden ser explotados por operarios con poca experiencia en tratamiento de aguas residuales.
- Consumo energético mínimo o nulo.
- Baja producción de residuos durante la operación del sistema.
- Bajo costo de explotación y mantenimiento en la operación del sistema.
- Bajo impacto ambiental sonoro y buena integración en el medio ambiente natural.

Desventajas:

- Requieren una superficie netamente superior (entre 20 y 80 veces superior a un método convencional).
- Costos de construcción similar, o incluso mayor si se debe adquirir el terreno donde se realiza la obra.
- Difíciles de diseñar bien dado el alto número de procesos y mecanismos implicados en la eliminación de los contaminantes.
- Pocos o ningún factor de control durante la operación.

- Los de flujo subsuperficial son muy susceptibles a la colmatación del medio granular si el agua tiene un contenido elevado en determinados contaminantes

Ventajas y desventajas entre los humedales subsuperficiales ante un humedal de flujo libre:

Ventajas:

- Menor incidencia de malos olores debido a la naturaleza subterránea del flujo.
- Bajo riesgo de exposición directa de las personas y de aparición de insectos gracias también al flujo subterráneo.
- Protección térmica debida a la acumulación de restos vegetales y del flujo subterráneo.

También evita la aparición de gradientes térmicos acusados (García *et al*, 2003)

Desventajas:

- Mayor costo de construcción debido fundamentalmente al material granular.
 - Menor valor como ecosistemas para la vida salvaje debido a que el agua es difícilmente accesible a la fauna.

2.4 Normativas y Regulaciones

Se reunió la información relevante de las distintas normativas vigentes en el país, lo cual se tuvo en cuenta al momento de diseñar el sistema de tratamiento para el afluente, con el fin de que esta propuesta pueda cumplir con los requerimientos y exigencias de éstas.

2.4.1 D.S. N° 90 del 2000: “Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales”

Esta es la única normativa existente en el país que restringe y establece la concentración máxima permisible para aguas residuales que son descargadas a un cuerpo superficial, tales como las lagunas.

En la Tabla 4 se detallan los límites máximos permitidos para la descarga de aguas residuales que descargan de manera directa en lagunas.

Tabla 4: Requisitos Permitidos Para Descargar a Cuerpos Lacustres

Contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permisible
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000-70*
DBO5	mg O2/L	DBO5	35
Fósforo	mg/L	P	2
Nitrógeno Total	mg/L	N	10
PH	mg/L	Ph	6-8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20

Fuente: (DS90,2000)

Los valores limitantes para la DBO, el fósforo, el nitrógeno, los sólidos suspendidos totales que exige este decreto equivalen a 35, 2,10 y 80 mg/l respectivamente, por lo que se puede determinar que los valores de agua lluvia para el nitrógeno, el fosforo y DBO5 se encuentran por debajo de la exigencia de normativa. No obstante los sólidos suspendidos sobrepasan estos valores exigidos por la normativa para descargar un agua lluvia a la laguna, por lo cual se requeriría de un tratamiento para dichos contaminantes.

CAPITULO III: METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología utilizada necesaria para el desarrollo de este proyecto de título. La Figura 8 muestra cada etapa abordada de la metodología en cuestión.

ETAPAS	SUB-ETAPAS				HITO
ESTUDIO DE ANTECEDENTES	Antecedentes Anteriores	Características de las Aguas Residuales	Alternativas de Tratamiento	Revisión de normativas	Estado del Arte
EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS		Criterios de Selección	Matriz de Selección	Descripción de la línea de tratamiento	Selección del Sistema de Tratamiento
CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA			Descripción Geográfica	Hidrología	Parámetros de Diseño
PROPUESTA DE MEJORAMIENTO		Modelo Matemático	Diseño del Sistema de tratamiento	Diseño de Obras Complementarias	Conclusiones y Recomendaciones

Figura 8: Esquema de Metodología.

3.1 Estudio de Antecedentes

3.1.1 Estudios anteriores

El objetivo principal de este estudio fue verificar investigaciones y trabajos que se han realizado hasta la actualidad en la laguna, con la finalidad de tomar aquellas consideraciones y propuestas determinadas que puedan servir como base para el diseño en este trabajo.

3.1.2 Características de aguas residuales

El objetivo es hacer una descripción de las aguas residuales, específicamente de las aguas lluvias que es la principal fuente de descarga de la laguna. La idea fue investigar las características contaminantes de esta agua, a modo de establecer el cumplimiento de la normativa chilena y el impacto sobre el cuerpo lacustre.

3.1.3 Alternativas de tratamiento

En esta etapa se realizó una investigación detallada sobre las alternativas de tratamiento disponibles, describiendo sus características fundamentales, ventajas y eficiencia, de manera de contribuir a tomar la mejor elección del tratamiento a utilizar.

3.2 Evaluación de las Alternativas de Tratamiento

3.2.1 Criterios de Selección

Para determinar la alternativa de tratamiento óptima a utilizar se establecieron criterios técnicos, medioambientales y sociales, ajustándose a los reales requerimientos y necesidades de la zona.

Cabe decir que no todos los criterios tienen la misma importancia, por lo tanto se definió una escala de prioridad.

3.2.2 Matriz de Selección de Selección

En tanto, para la evaluación de las alternativas analizadas éstas compararon frente a cada criterio mediante un sistema de matrices. Los resultados obtenidos se constituyen en una matriz general, donde finalmente se determinó el sistema a utilizar.

3.2.3 Descripción de la línea de tratamiento

Ya seleccionado el sistema de tratamiento, se determinó cómo operará, considerando el tipo de agua a tratar, como también las condiciones actuales que se presentan en la zona donde se emplazará el proyecto.

3.3 Caracterización de la Zona en Estudio

3.3.1 Zona geográfica

Se define la zona a evaluar, donde se realizó un reconocimiento en terreno de la situación actual de la laguna. Además a través de la topografía se definieron las curvas de nivel del sector donde se emplazará el proyecto.

3.3.2 *Hidrología*

Se determinó los distintos sucesos meteorológicos e hidrológicos ocurridos en la cuenca, en la cual se definirán parámetros que servirán de base para el diseño del sistema de tratamiento.

3.4 Propuesta de Mejoramiento

3.4.1 *Modelo Matemático*

Se definió el modelo matemático a utilizar a previa a una detallada revisión bibliográfica, considerando el agua a tratar y la calidad propia del medio receptor, de manera de no sobrestimar el diseño.

3.4.2 *Diseño del Sistema de Tratamiento*

Determinada las características de las aguas y los parámetros que influyen en el diseño, se evaluó el comportamiento del sistema de tratamiento para las distintas concentraciones de entrada y posteriormente se determinó la eficiencia en el proceso de remoción de los contaminantes.

3.4.3 *Diseño Obras Complementarias*

Se diseñaron las obras para una cadena de colectores los cuales desvían las entradas de aguas lluvias para ser ingresadas directamente por el humedal hacia la laguna.

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL TEMA

En este capítulo se describe una metodología de comparación entre las distintas alternativas analizadas anteriormente. Luego se detallan los factores hidrológicos relevantes que ocurren en la zona de estudio, para luego llevar a cabo el diseño del sistema de tratamiento.

4.1 Evaluación de alternativas de tratamiento

El objetivo es seleccionar la alternativa que sea técnicamente aplicable para el flujo y la carga contaminante de las aguas a tratar, basándose en las necesidades y características de la zona. Para cumplir este objetivo, se evaluó cada alternativa bajo un modelo de selección, utilizando una metodología de decisión de multicriterios entre las distintas alternativas.

Se detallan los criterios fundamentales y una vez valorados estos aspectos, se procederá a la elección.

4.1.1 Criterios de Selección

Se definen los criterios selección los cuales corresponden a las características que se evalúan para determinar la solución óptima.

- a) Criterios técnicos: Características principales de la depuradora y aspectos en la construcción de éstos, tales como :
- Simplicidad de construcción: obra civil y equipos necesarios.
 - Rendimiento en la eliminación de los contaminantes: Se analizará la eficiencia en la eliminación de los contaminantes pH y los sólidos suspendidos totales, ya que éstos sobrepasan los límites de la norma.
 - Estabilidad del proceso: la estabilidad puede verse afectada a través de cambios bruscos en la carga de los contaminantes y del caudal, lo que puede afectar el rendimiento de la depuradora.
 - Requerimiento de terreno: la superficie necesaria para implantar un sistema de tratamiento es uno de los elementos más importante, ya que no se dispone de una extensa superficie para poder instalar el sistema de

tratamiento.

b) Criterios medioambientales: Tiene como objetivo conservar el entorno natural de la zona, por ende, se evaluarán aspectos como:

- Integración con el medio: Se analizan aspectos como la afectación paisajística, es decir, la relación entre el sistema de depuración con la armonía del entorno.

c) Criterios sociales: Se refiere a la aceptación socio-cultural y qué tan apropiado es el sistema ante las percepción de la población, promoviendo la mejora de calidad de vida y mejoras ambientales sanitarias, por lo tanto el parámetro a evaluar será:

- Impacto en la población: Efectos sobre la población tales como molestias de ruidos y/o aparición de insectos, los que pueden presentar molestias a la comunidad.

4.1.2 Priorización de los criterios.

Se procedió a asignar el peso para cada criterio en: baja importancia, importancia media e importancia alta; luego para calificar en escala de 1 al 10 (Tabla 5).

Importancia alta=5; Importancia media=3; baja importancia=1

Tabla 5: Prioridad de Cada Criterio

Criterio	Descripción	Peso Asignado
Técnicos	Obra civil y requerimiento de equipos	1
	Remoción DBO	5
	Remoción de N y P	5
	Remoción SS	5
	Caudal/Carga	1
	Req. de terreno	3
Medio ambiental	Integración con el medio	5
Social	Ruidos	3
	Insectos	3

4.1.3 Selección del Sistema de tratamiento

A partir de la descripción de cada criterio se procedió a calificar cada uno de éstos de manera cualitativa y transformarla en cuantitativa en una escala del 1 al 10. Posteriormente a la calificación de los sistemas ante cada criterio, se seleccionará el sistema mediante una matriz final (Tabla 6), con la ecuación 1 expresada de la siguiente manera:

$$A_j = \frac{\sum_1^8 [a_{ii} \cdot g_i]}{\sum_1^8 g_i} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

A_j = Puntaje final para cada alternativa evaluada,

A_{ii} = Puntuación de cada alternativa evaluados en los

distintos criterios, g_i=Puntuación de peso asignado.

Tabla 6: Matriz Final de Selección de Alternativas Evaluadas

Criterio	Parámetro	Matriz Final					Peso Asignado
		Lagunaje	Humedal Sup.	Humedal Subsup.	Filtro Percolador	Bíodiscos	
Simplicidad en la Const.	Obra civil y requerimiento de equipos	10	10	10	5	3	1
Rendimiento	% DBO	7,8	9,5	9,5	9	9	5
	N	4,5	4,8	4,8	3,3	4,3	5
	P	4	3,3	3,3	2,8	2,3	5
	% SS	4	9,5	9,5	9	9	5
Sencibilidad y estabilidad	Caudal/Carga	10	8	8	5	10	1
Imp. Ambiental	Integración con el medio	10	10	10	4	4	5
	Ruidos	10	10	10	8	8	1
	Insectos	5	3	8	8	10	3
Req. de terreno	m2/hab	4,5	4,5	4	10	10	3
Puntaje total		4,93	5,75	6,15	5,35	5,62	

Resultado:

Los humedales artificiales presentan mayor puntuación en comparación con las demás alternativas. Esto se debe a que se comporta mucho mejor ante los criterios que tienen mayor preponderancia en el análisis, es decir, a pesar de que requiere extensas áreas lo que puede jugar en contra, se puede ver compensado por su gran remoción en los coliformes fecales y a la vez tiene una mayor integración con el medio que las demás alternativas.

4.1.4 Descripción de la línea de tratamiento

Con el fin de cumplir con el objetivo ambiental de este trabajo, se propone recircular el agua de los afluentes pluviales a través del humedal por medio de una línea de colectores llevándolas hacia el sistema de depuración y permitiendo la autodepuración del sistema.

Para desarrollar lo descrito anteriormente se ha tenido en cuenta los siguientes antecedentes:

- Levantamiento topográfico del sector en el que se definieron las cotas y curvas de nivel.
- El modelo matemático de diseño propuesto por Reed y las condiciones y recomendaciones propuestas en la literatura.
- Los factores climatológicos que intervienen en el diseño.

El detalle del Sistema de tratamiento propuesto se muestra con más detalle en los planos adjuntos en el Anexo G.

4.2 Hidrología

La precipitación y las temperaturas de la zona estudiada toman un rol fundamental en el análisis para la propuesta del sistema de tratamiento, debido a que la intensidad de estos eventos va a definir la cantidad de agua a tratar en el humedal y en el diseño de las obras complementarias.

Se determinaron los cambios producidos a través del humedal, debido a las consecuencias de los factores climatológicos que suceden en el tiempo.

Considerando el humedal como un sistema abierto, se establecen las entradas y salidas de la siguiente manera:

- Entradas: Precipitaciones (Qp), Afluente (Qa)
- Salidas: Efluente (Qe), Evapotranspiración (ETP), Infiltración (I).

El humedal está impermeabilizado por una membrana en la parte final del tratamiento, por lo tanto no hay infiltración. Los parámetros que intervienen significativamente a la hora de realizar este balance son la pluviosidad y la evapotranspiración, por lo tanto el almacenamiento en el Humedal Artificial está dado por:

$$\text{Almacenamiento en el Humedal} = (Qa+Qp)-(Qe+ETP)$$

a) Caudal medio anual

Se determinó el análisis hidrológico de la cuenca que permite determinar el Caudal medio anual de ingreso a la laguna. La determinación del caudal se hizo a través del Método Racional, de manera que se consideraron las precipitaciones en la última década en la zona (2001-2011), datos proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile. Se determina que la media anual es de 1081 mm (ver más detalle en Anexo E), lo cual significa que en este caso la intensidad media anual para el sector de la Laguna Lo Méndez es de 0,123 mm/hr., además se estima que el área que tributa hacia la red de colectores que descargan en la laguna equivalen a 0,12 Km²

De acuerdo a los datos antes señalados se establece que el caudal medio anual de 195 m³/día (ver cálculo en Anexo E)

b) Precipitación Media

Se determina la intensidad de la precipitación media anual, con el fin de ver la incidencia del caudal que ingresará al humedal. Se determinó que al humedal ingresará por esta vía 4,72 m³/día (ver cálculo en Anexo E).

d) Evapotranspiración (ETP)

Existen varios métodos empíricos para calcular la evapotranspiración. Para este estudio se buscó una ecuación en la cual existiera una relación entre la evapotranspiración y los factores climáticos de los cuales haya datos abundantes y fáciles de determinar, sin perder la exactitud necesaria en el cálculo basado en la relación existente entre ETP y la

temperatura media mensual.

Es por esto que se procedió a utilizar el método de Thornthwaite, ya que relaciona la evapotranspiración producida en una cuenca en función de las temperaturas medias producidas y el número de horas de la luz solar en el día. Para ver con más detalle cómo se determinó la evapotranspiración media ir a Anexo B.

En efecto, la evapotranspiración media mensual corresponde a 23,8 mm lo que equivale a una intensidad de 0,033 mm/h. Considerando el área del humedal 1600 m², se obtiene una evapotranspiración de 0,92 m³/día.

e) Caudales de crecidas.

A partir de los valores ya mencionados tanto para el área que tributa hacia la red de colectores y el coeficiente de escorrentía, se determina la intensidad de la tormenta a través de las curvas IDF. Se determinaron intensidades asociadas a diferentes periodos de retorno ocurrido en la cuenca. Una vez determinada la intensidad, es posible determinar los caudales de crecidas, los que se determinaron a través de método racional, utilizando el área total de la cuenca y el área de drenaje aportado por la red de colectores. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 7 (ver más detalle Anexo E).

Tabla 7: Caudales de Crecidas en la Red de Colectores

T	tc	I	Qtotal (Cuenca)	Q (red de colectores)
años	min	mm/hr	m3/s	m3/s
2	29	24,376	3,426	2,937
5	26	33,928	4,768	4,089
10	24	41,569	5,842	5,009
25	21	52,143	7,328	6,284
50	20	60,455	8,496	7,285
100	19	69,009	9,698	8,316

4.3 Propuesta de Mejoramiento

Previa evaluación de los diferentes factores que están involucrados en el funcionamiento de la depuradora, tanto climatológico como topográfico, se muestra las ecuaciones presentes en el diseño de la planta de tratamiento basada en un sistema de depuración mediante humedales artificiales. Además se determinan consideraciones particulares presentes en el diseño para ajustar los cálculos a la opción que obtenga mayores rendimientos en el tratamiento de las aguas a tratar.

4.3.1 Ecuaciones de Diseño de un Humedal Artificial Subsuperficial

Los dos principales modelos utilizados mayoritariamente a nivel internacional son los propuesto por Reed y el modelo de Kadlec (Lara J, 2005). La comparación de métodos para el cálculo de las superficies demuestra que los modelos de Kadlec y Knight predicen superficies mayores que el modelo de Reed debido a la ausencia del efecto de la temperatura en algunas variables. Este modelo es más conservativo que el de Reed, debido que sus constantes de reacción son consecuencia del análisis conjunto de sistemas superficiales y subsuperficiales, sistemas que fueron diseñados según reglas muy generales de superficie por habitante equivalente y con datos que no consideraban los balances de masas, sino las concentraciones (Young *et al*, 1998).

Es por esto, considerando la baja concentración del contaminante a tratar y la calidad propia del medio receptor se han considerado los modelos de diseño sugeridos por Reed y algunas consideraciones basadas en la literatura.

A continuación se muestran las principales ecuaciones para la remoción de la materia orgánica, nitrógeno, fósforo y sólidos suspendidos (ver más detalle del análisis del modelo matemático en Anexo A.6).

a) Diseño Hidráulico

El diseño hidráulico de un Humedal Artificial es fundamental para el éxito de su rendimiento. Todos los diseños actualmente asumen condiciones de flujo a pistón.

El tiempo de residencia hidráulica en el humedal se puede determinar con la expresión:

$$t = \frac{v}{q} = \frac{\varepsilon \cdot A_s \cdot y}{Q} \quad \text{Ec. (2)}$$

La ecuación 10 es determinada a través de la ley de Darcy y permite calcular el ancho mínimo de una celda de humedal que sea compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño.

$$W = \frac{1}{y} \cdot \sqrt{\frac{Q_{med} \cdot L \cdot W}{m \cdot K_s}} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

W: Ancho mínimo del Humedal (m),

y: Altura del agua en el lecho (m),

Q_{med}: Caudal medio (m³/d)

L: Largo del humedal (m),

m: Pendiente longitudinal (m/m),

k_s: Coeficiente de permeabilidad (m³/m³/d).

b) Modelo General de diseño

Obtención de la concentración del contaminante en el efluente viene dada por la expresión:

$$C_i = \frac{C_o}{e^{\frac{kt \cdot A_s \cdot y \cdot \varepsilon}{Q}}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

C_i: Concentración del contaminante en el efluente, (mg/l).

C_o: Concentración del contaminante en el afluente, (mg/l).

ε: Porosidad disponible para el flujo del agua a través del humedal, en tanto por uno.

A_s: Superficie del humedal, en m².

Y: Profundidad media del humedal, en m.

Q: Caudal medio a través del humedal, en m³/d.

Kt la constante de cinética de primer orden, en días⁻¹.

El valor de Kt depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura. Está dado por la ecuación:

$$Kt = K_R \cdot \theta^{(T_w - T_R)} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde,

K_R : Constante de reacción a la temperatura de referencia (20 °C) en 1/d. (Tabla 8)

T_w : Temperatura del agua considerada en el dimensionado, en ° C.

T_R : Temperatura de referencia con la que se ha calculado el coeficiente θ_R , en ° C.

θ_R : Coeficiente de temperatura, adimensional.(Tabla 8).

Tabla 8: Coeficientes de temperatura y constantes de reacción para 20°C.

Coeficientes de temperaturas y Constantes de Reacción				
Parámetro	DBO5	NH4	NO3	Coliformes fecales
KR, d-1	1,104	$0,01854 + 0,3922 \cdot (\text{hrz})^{2,6077}$	1	2,6
θ_R , adim.	1,06	1,048	1,15	1,19

Nota: Las temperaturas de aplicación deben ser superiores a 1° C; hrz es la profundidad del lecho ocupado por la rizosfera.

c) Remoción del fósforo

Para remoción del fósforo viene dada por la expresión:

$$C_o = C_i \cdot e^{-\frac{K_p}{HLR}} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

C_i = Concentración del contaminante en el efluente, (mg/l),

C_o = Concentración del contaminante en el afluente, (mg/l),

K_p : constante de reacción, con un valor de 2,73 cm/d,

HLR : la carga hidráulica (Hydraulic Load Rate) viene dado por la ecuación:

$$HLR = \frac{100 \cdot Q}{A_s} \quad \text{Ec. (7)}$$

d) Remoción de los sólidos suspendidos

La concentración en el efluente de sólidos suspendidos viene dada por la siguiente expresión:

$$C_o = C_i \cdot (0,1058 + 0,0011 \cdot HLR) \quad \text{Ec. (8)}$$

4.3.2 *Diseño del Humedal Artificial*

Previo al diseño del Humedal se tomaron las consideraciones pertinentes con la finalidad de encontrar el rendimiento óptimo de la depuradora las cuales se describen a continuación:

- Vegetación:

La vegetación a plantar será Espadaña (*phragmites australis*) ya que esta planta tiene varias ventajas debido a que se trata de una planta durable de rápido crecimiento, altamente eficaz en la absorción de minerales pesados. Estéticamente amigable a la vista.

- Medio Granular:

Se opta por una grava medio 25 mm de diámetro, ya que a mayor tamaño de la partícula, la capacidad hidráulica del biofiltro aumenta, pero disminuye la eficiencia en la remoción de contaminantes al tener una menor área para el crecimiento bacteriano. Por tal razón, la elección del tamaño de la grava escogida tratará de conseguir el equilibrio entre los aspectos hidráulicos y la eficiencia de remoción.

- Área del humedal:

Procedimiento usual para determinar las dimensiones del humedal es establecer el área de remoción para cada contaminante, siendo el contaminante que requiera mayor área el que controle el tamaño del humedal. Sin embargo, en base a lo que se observó en terreno y a la topografía, sólo se dispone una superficie de 2000 m². Es por esto, que el humedal se dividirá en dos celdas (1000 m² cada uno), donde se determinará el ancho mínimo y así pueda cumplir con las condiciones hidráulicas del sistema, para luego obtener las concentraciones del afluente a la salida comparándose con los valores que exige la normativa.

- **Concentración de entrada:**

Para el cálculo de la remoción de los contaminantes se evalúan distintas concentraciones de entrada al humedal, con el fin de ver el comportamiento del sistema a través de las variaciones que se podrían generar.

- **Caudal :**

El Humedal Artificial tratará el caudal generado por la red de colectores. Cabe también mencionar que el efecto de evapotranspiración y la precipitación directa en el Humedal Artificial serán despreciados ya que el caudal a tratar será muy superior en comparación a éstos.

- **Datos de Partida:**

Se tiene los siguientes datos de partida ante el previo estudio establecido en los capítulos anteriores, que permitirán establecer las dimensiones del Humedal Artificial subsuperficial. Además, se recogen los cálculos para estimar las concentraciones de salida del efluente del humedal subsuperficial, con el fin de que ésta cumpla en base a lo establecido en la normativa.

Datos de Entrada Afluente:

➤ DBO	: 10,1 mg/l
➤ Sólidos Susp. Totales	: 14,05 mg/l
➤ Nitrógeno Total	: 1,18 mg/l
➤ Coliformes Fecales	: 1469 mg/l
➤ Fósforo	: 0,1 mg/l
➤ Caudal	: 1122 m ³ /día
➤ Largo	: 50 m
➤ Ancho	: 40
➤ Medio	: Grava media 25 mm (0,7 m de profundidad) : Tierra Vegetal (0,15 m de profundidad)
➤ K _s	: 25.000 m ³ /m ² /d
➤ ε	: 0,4
➤ Profundidad del agua “y”	: 0,7 m
➤ Pendiente del humedal	: 3%
➤ Caudal por celda	: 250 m ³ /día

a) Diseño Hidráulico

- Ancho mínimo del humedal: Utilizando la ecuación (3) será equivalente:

$$w = \frac{1}{0,6} \cdot \sqrt{\frac{250 \cdot 2000}{0,03 \cdot 25.000}} \approx 36,8 \text{ m}$$

Como el ancho mínimo es de 36,8 m se considerará un ancho de 40 m, por lo tanto el área del humedal es:

$$l = \frac{As}{w} = 50 \text{ m.}$$

El tiempo de residencia hidráulica viene dado por la ecuación (2):

$$t = \frac{0,4 \cdot 2000 \cdot 0,6}{250} = 2,2 \text{ (días)}$$

➤ Remoción de la DBO

Se calcula la constante cinética de primer orden “Kt” mostrada en la ecuación (5) y los valores extraídos de la Tabla 8; asumiendo una temperatura del agua en el humedal de 12°C. Esta temperatura se obtiene a partir de las ecuaciones expuestas por Reed *et all*, las cuales se muestran en el Anexo E.

$$K_t = 1,104 \cdot 1,06^{(11,6-12)} = 1,08 \text{ d}^{-1}$$

Se obtiene la concentración de la DBO en el efluente utilizando la ecuación (4), evaluando distintos valores de concentraciones. El valor de DBO en el efluente es de 0,897 mg/l.

Se calcula la eficiencia (η) del tratamiento:

$$\eta = \frac{C_o - C_i}{C_o}$$

Reemplazando los datos obtenidos:

$$\eta = \frac{10,1 - 0,89}{10,1} = 91\%$$

Se logró una eficiencia en la remoción de la DBO de un 91%, lo cual es óptimo para el rendimiento que comúnmente se obtiene en los humedales artificiales, ya que éstos

pueden alcanzar una eficiencia por sobre un 85%. Así mismo, también se determinó un tiempo de retención equivalente a 2,24 días lo que se considera como un valor relativamente promedio, ya que el tiempo de retención en los humedales normalmente puede alcanzar los 4 días. Sin embargo, a pesar de los bajos índices de remoción, se logra reducir la DBO que inicialmente en su condición de entrada ya cumplía con la normativa para concentraciones de entrada menores a 35 mg/l. Además cabe destacar que la concentración media para las agua lluvia equivalente a 10,1 mg/l (Tabla 2) presenta una remoción de 4,7 mg/l, lo cual cumpliría con lo exigido por la el Decreto Supremo 90/2000.

➤ Remoción del Nitrógeno

Se determina la remoción de Nitrógeno total en el afluente, con su respectivo cálculo de K_t .

$$K_t = 0,01854 + 0,3922 \cdot 1^{2,6077} = 0,4036 d^{-1}$$

El valor de concentración final en el efluente corresponde a 0,477 mg/l.

Se calcula la eficiencia (η) del tratamiento:

$$\eta = \frac{1,18 - 0,477}{1,18} = 60\%$$

Se obtiene una eficiencia del 60% el cual es un valor óptimo para la remoción de contaminante. Cabe destacar que al igual que el caso anterior, las concentraciones de nitrógeno en la entrada ya cumplían de por sí con las exigencias del Decreto Supremo 90/2000.

➤ Remoción del fósforo:

A partir de las ecuaciones (6) y (7) se obtiene la concentración del fósforo en el efluente. Se calcula la eficiencia (η) del tratamiento para la remoción de fósforo:

$$\eta = \frac{0,1 - 0,08}{0,1} = 20\%$$

Como se puede observar, el humedal artificial no es muy eficiente de por sí para la eliminación del fósforo. A pesar de que se cuenta con un terreno bastante amplio para el

proceso, la eficiencia no supera un 40% de remoción. Sin embargo se sigue cumpliendo con la normativa.

➤ Remoción de los sólidos suspendidos

De la ecuación (7) y (8) se obtuvo la concentración en el efluente de sólidos suspendidos.

La eficiencia para la remoción de los sólidos:

$$\eta = \frac{14,05 - 1,68}{0,1} = 88\%$$

Se obtiene una remoción para los sólidos suspendidos de 88% y una concentración en el efluente de 1,68 mg/l, por debajo de los 80mg/l exigido por el DS90/2000. Esta alta eficiencia se debe a que la remoción de ésta no es afectada por la temperatura como los demás contaminantes, además de destacar que para remover lo sólidos suspendidos requiere de un menor tiempo de residencia.

➤ Remoción de Coliformes Fecales.

Siendo el único contaminante en el afluente que excede lo permitido por el DS90/2000, se procedió al cálculo de la remoción de su concentración.

$$\eta = \frac{1469 - 6,236}{1469} = 99,5\%$$

El valor de la concecntración en el efluente se redujo a 6,23 mg/l con un rendimiento casi del 100%.

A continuación se presenta un cuadro resumen con las respectivas concentraciones de contaminantes tanto en el afluente como en el efluente y la eficiencia del método.

Contaminante	Concentración mg/l		Eficiencia
	Afluente	Efluente	
DBO	10,1	0,89	91,1%
Nitrógeno	1,18	0,47	59,5%
Fósforo	0,1	0,08	19,6%
Sólidos en Suspensión	14,05	1,68	88,0%
Coliformes Fecales	1469	6,23	99,6%

4.3.3 *Diseño de Obras complementarias.*

Como se detalló anteriormente, el flujo proveniente de la red de colectores se captará a través de un sedimentador para luego ser conducido a través de un colector subterráneo hacia una cámara de distribución, la cual tiene la función de distribuir y dirigir el caudal que se quiere tratar hacia los humedales y el caudal que descargará directamente a la laguna (ver detalle de la cámara en planos, Anexo G).

A continuación se diseñarán las obras anexas al sistema de tratamiento correspondiente a los colectores proyectados, donde las pendientes y ubicación de éstos se ajustaron a las condiciones topográficas del sector donde se emplazará la obra.

a) Capacidad hidráulica de colectores proyectados.

Los colectores se materializarán en cemento comprimido cuyos diámetros, largos y pendientes se indican en el plano adjunto (anexo G). Se determinan los parámetros hidráulicos de los colectores frente a un caudal asociado a una precipitación de 5 años de periodo de retorno y se verifica su capacidad a través de la fórmula de Manning (ver en forma detallada Anexo A.9). A continuación se muestra en la Tabla 9 la verificación hidráulica de los colectores:

b) Movimiento de Tierras.

Las excavaciones para cámaras de inspección, cañerías, etc. Se ejecutarán de acuerdo con el trazado y pendientes indicados en los Planos del Proyecto. Deberán realizarse de manera que las cañerías se apoyen en toda su superficie o extensión, sobre terreno firme y regular. Una vez practicadas las pruebas de instalaciones se rellenará lo que resta de las excavaciones mediante capas de suelo no mayores de 25 cm.

El ancho en el fondo de la zanja se ha considerado igual al diámetro del tubo más 0,60 m. La pared de la zanja se ha considerado con un talud 1:10 hasta 2 metros de profundidad y desde allí hasta el fondo de la zanja con paredes verticales.

El suelo de relleno deberá humedecerse previamente y se compactará mediante procedimiento hidráulico o mecánico, tomando las precauciones necesarias.

c) Relleno de Excavaciones:

- Cama de apoyo: La tubería irá apoyada en un relleno de arena compactada del ancho de la excavación de una altura de 0,10 m. Estará formada por arena limpia, con no más de un 10% de finos (que pasa por malla A.S.T.M. N°200), compactada con placa vibrante de no menos de 100 Kg de peso estático. Se exigirá una densidad relativa no menor de 75%.
- Relleno Lateral: Este se hará con arena limpia con no más de un 10% de finos colocado por capas de 0,10 m y fuertemente apisonada con pisón manual. Se colocará lateralmente en los tubos y hasta el nivel de la clave.
- Relleno de primera capa: Sobre la clave del tubo se dispondrá una primera capa de relleno de 0,30 m compactada con pisón manual hasta obtener una densidad no inferior a 90% proctor modificado.
- Relleno superior medio: Se efectuará por capas de 0,30 – 0,50 m compactada con pisón mecánico de manera que se obtenga una densidad máxima no inferior al 90% Proctor Modificado.
- Relleno Superior Final: Capa de 0,70m de relleno, medido desde la superficie, tendrá un grado de compactación de una densidad relativa no menos del 75% o correspondiente a un 95% de la densidad máxima Proctor Modificado.

d) Cámaras de Inspección:

Se consultará un emplantillado de hormigón pobre de 170 kg cem/m³ de 7 cm. de espesor bajo la planta de la cámara a construir.

Se consultará hormigón H30 con 90% nivel de confianza según norma Nch170 of 1985 para la confección de la cámara según los planos del proyecto. La trabajabilidad del hormigón debe estar dado por un cono de Abraham de 8 centímetros y un tamaño máximo de árido de 1.5”.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se entregan las conclusiones respecto del trabajo realizado y de los resultados obtenidos en el diseño del sistema de depuración. Al término del capítulo se presentan recomendaciones con respecto a la operación y mantenimiento de ésta y propuestas para futuras líneas de investigación.

5.1 Conclusiones

- ✓ La principal fuente de contaminación en la laguna lo Méndez proviene de las descargas de aguas pluviales, repercutiendo de manera negativa en la calidad del agua de la laguna, ya que éstas poseen concentraciones que pueden superar a lo establecido en la normativa chilena vigente.
- ✓ Al evaluar las alternativas se concluye que el sistema más adecuado para el tratamiento del afluente es un Humedal Artificial Subsuperficial, debido a su gran integración al medio, siendo armónico con el paisaje y se adecúa perfectamente a las variaciones del caudal que se puedan presentar.
- ✓ Se estimaron tanto los caudales de crecida como los caudales medios ocurridos en la cuenca analizada, donde se determinó la imposibilidad de tratar toda el agua que llega por la red de colectores, debido a la gran área que tributa hacia ésta. Sin embargo, el principal objetivo era tratar el agua de las primeras lluvias, dado que concentran mayores contaminantes, por lo tanto el caudal a tratar se reduce considerablemente, permitiendo mejorar la eficiencia del sistema de depuración.
- ✓ Con respecto a eliminación de los contaminantes del afluente de la laguna (DBO, Nt, P, SSt y CF) se logra una remoción suficiente para que pueda cumplir con la exigencia del Decreto Supremo 90.

5.2 Recomendaciones

- ✓ En caso de ser construido el Humedal Artificial subsuperficial, se recomienda a las Autoridades Municipales mantener una adecuada operatividad y mantenimiento del sistema de tratamiento para garantizar un correcto funcionamiento en todo momento. Por otro lado, también se sugiere una vez operando el sistema de tratamiento que las actividades de operación y mantenimiento debieran ser descritas en un plan por escrito, el cual debe ser elaborado por la entidad responsable de la mantención del humedal. El plan debe proporcionar un calendario de rutina sobre la limpieza de los sistemas de distribución y sobre la inspección y supervisión del sistema.
- ✓ Con respecto a la mantención del Humedal Artificial, la poda de las plantas de humedal se debe realizar en época de primavera-verano, puesto que en épocas de bajas temperaturas la vegetación protege de la congelación y como cabe recordar ésta variación podría provocar una alteración en los rendimientos de la depuradora.
- ✓ El enfoque central que se busca para la buena operación del humedal es potenciar la diversificación de zonas en el humedal, es por esto que es necesario la buena distribución del agua.
- ✓ El humedal deberá ser controlado y evaluado periódicamente para observar si está cumpliendo con su correcto funcionamiento con el fin de descubrir los problemas potenciales puedan ser adversos para la eficiencia de la planta de tratamiento, como erosión o crecimiento de vegetación indeseable, entre otros y así tomar las medidas adecuadas de corrección.
- ✓ En el caso de la cámara decantadora se sugiere que sea limpiada periódicamente, con el fin de prevenir entrada de material inorgánico (arenas) y así evitar problemas de colmatación de las tuberías de distribución del Humedal Artificial.
- ✓ Dado que no existe ninguna norma que defina estándares de carga contaminante para las aguas pluviales, se recomienda hacer un estudio detallado en el largo plazo para medir las concentraciones en los contaminantes presentes en las aguas pluviales de la zona en estudio.

- ✓ Finalmente, tomando este trabajo de título como base, se propone seguir con estudios más detallados respecto a la viabilidad de implementación de estas tecnologías de depuración, de modo de innovar en sistemas de tratamiento que apunten a seguir la misma línea de lo que está siendo utilizado a nivel mundial.

CAPITULO VI: BIBLIOGRAFÍA

1. Alianza por el Agua, Zaragoza (2008). Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua. Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Zaragoza : Monográficos Agua en Centroamérica .
2. Arias & Brix. (2003). Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina , 17-24.
3. Collado. (1992). *Depuración de Aguas Residuales en pequeñas comunidades*. Madrid: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos. .
4. Decreto Supremo 90 (2000). Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a la descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
5. Dirección Meteorológica de Chile (2000-2010). Anuario Climatológico. Santiago.
6. Eddy (1996). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización . Mc Graw Hill. En español, traducido de la 3ª edición en inglés.
7. EPA. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo subsuperficial. Washington, D.C.
8. Esteves, F. (1988). *Fundamentos de limnología*. Río de Janeiro: Interciencia
9. Fair, Geyer & Okun. (1968). *Purificación de aguas y Tratamiento y remoción de aguas residuales*. México: Limusa.
10. Fernández, A. (2009). Desarrollo de un sistema de tratamiento del agua de escorrentía superficial procedente de aparcamientos impermeables usando flujo ascendente y geotextiles. Tesis doctoral.Universidad de Cantabria. España.
11. Fernández, J. (2005). Manual de Fitodepuración: Filtros de macrofitas en flotación. Madrid: Edita.
12. García J., Morato J., Bayona J. (2004). Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos.
13. García J., Morato J., Bayona J. (2003). Depuración con Sistemas Naturales : Humedales Construidos. Tecnoambiente , 37-47.
14. Henry, J. (1999). Ingeniería Ambiental. México: Pearson.
15. KADLEC, K. (1996). Treatment Wetlands CRC, Press, Florida.

16. Lara, J.(2005). Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua,Cundinamarca,Colombia. *Ingeniería Y Universidad*, vol:9, num 1 , 47-63.
17. Lara, J. (1999). *Depuración de Aguas Municipales con Humedales Artificiales*. Tesis master en Ingeniería y Gestión Ambiental . Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña .
18. Llagas. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNSM. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG* , 15(17), 85-96.
19. Manual de Carreteras (2010).Capitulo 2; Ingeniería Básica aspectos de hidrología, hidráulica y transporte de sedimentos. Manual.
20. Mendonça, S. C. (1990). *Lagunas de estabilización y aireadas:Nuevos conceptos*. João Pessoa, Brasil: S.R. Mendonça, 388 pp.
21. Dirección Meteorológica de Chile. (2000-2010). *Anuario climatológico*. Santiago.
22. Moncada, F. (2011). *Diagnóstico de la calidad ambiental de la laguna lo Méndez y propuesta de recuperación urbana*. Proyecto de Título presentado en obtener el Título de Ingeniero Civil . Concepción: Universidad del Bío-Bío.
23. Montt, J., Rivera, P., Fenández, B., & Valenzuela, R. (2003). *Caracterización de la calidad de las aguas lluvias urbanas de santiago*.Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.XVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
24. Ramalho, R. (1996). *Tratamientos de Aguas Residuales*. En *Pretratamiento y Tratamiento primario* (pág. 91). Barcelona: Reverté.
25. Reed, Crites & Middlebrooks (1995). *Natural systems for Waste Management and Treatment*. 2nd edition. New York: McGraw-Hill.
26. Ruiz, R. (2000). *Alternativas y diseño para la disposicion de efluentes cloacales en areas rurales*. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre.
27. Seoáñez, M. (1999). *Aguas Residuales Urbanas*. Barcelona: Mundi-Prensa.
28. Stearman, G (2003). *Pesticide removal from container nursery runoff in constructed wetalnd cells*. *Environmental Quality*.
29. Vásquez & Valdés. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición*

de las aguas residuales.

30. Wright, Bernard & Nebel. (1999). Ciencias ambientales: Ecología y desarrollo sostenible. México: Pearson Educación.
31. Young, White ., Brown, Burton & Atkins. (1998). The constructed wetlands manual. Department of Land and Water Conservation. New South Wales, Australia

ANEXOS

INDICE

ANEXO A: BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	44
A.1 Eutrofización	44
A.2 Lagunaje	44
A.2.1 <i>Funcionamiento</i>	44
A.2.2 <i>Ventajas y desventajas</i>	46
A.2.3 <i>Eficiencia</i>	46
A.3 Filtros Percoladores	47
A.3.1 <i>Ventajas y desventajas</i>	47
A.3.2 <i>Eficiencia</i>	47
A.4 BIODISCOS	48
A.4.1 <i>Ventajas y Desventajas</i>	48
A.4.2 <i>Eficiencia</i>	48
A.5 Humedales Artificiales	48
A.5.1 <i>Elementos de un humedal</i>	48
A.5.2 <i>Remoción de los contaminantes</i>	52
A.6 Modelo para el diseño de humedales artificiales subsuperficiales	53
A.6.1 <i>Modelo General de diseño</i>	54
A.6.2 <i>Diseño térmico</i>	56
A.6.3 <i>Diseño hidráulico</i>	58
A.7 Evapotranspiración	60
A.8 Pérdidas de carga	62
A.8.1 <i>Pérdidas de carga singulares</i>	63
A.8.2 <i>Pérdidas de carga regulares</i>	64

A.9	Dimensionamiento de tubería.....	65
A.9.1	<i>Ecuaciones de Escurrimiento</i>	65
A.9.2	<i>Ecuación de Chezy-Manning</i>	65
ANEXO B: METODOLOGÍA DE CALIFICACIÓN DE CADA ALTERNATIVA		
	DE TRATAMIENTO ANTE CADA CRITERIO	66
B.1	Justificación de los Criterios	66
B.2	Puntuación de los criterios	67
ANEXO C: ESPECIFICACIONES GENERALES EN LA CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENCIÓN DEL HUMEDAL SUBSUPERFICIAL		
		70
C.1	Especificaciones Generales en la construcción.....	70
C.1.1	<i>Limpieza y establecimiento de una plataforma de trabajo</i>	70
C.1.2	<i>Trazado y replanteo</i>	70
C.1.3	<i>Excavación y movimiento de tierras</i>	71
C.1.4	<i>Disposición de tuberías</i>	71
C.1.5	<i>Impermeabilización</i>	71
C.1.6	<i>Plantas</i>	72
C.1.7	<i>Medio granular</i>	72
C.2	Operación y Mantenimiento.....	72
C.2.1	<i>Inspecciones iniciales y pruebas</i>	73
C.2.2	<i>Operación y control</i>	73
C.2.3.	<i>Nivel de agua y de control de flujo</i>	74
C.2.4	<i>Mantenimiento de la vegetación</i>	74
C.2.5	<i>Control de olor</i>	74
C.2.6	<i>Control de plagas de insectos</i>	74
C.2.7	<i>Mantenimiento de la geomembrana</i>	75
C.2.8	<i>Medio granular</i>	75

ANEXO D: ZONA EN ESTUDIO.....	76
D.1 Fauna	76
D.2 Flora	76
D.3 ·Contaminación por desechos sólidos y escombros	77
D.4 Descargas de Aguas lluvias en la Laguna	77
ANEXO E: RESULTADOS Y TABLAS	78
E.1 Hidrología	78
<i>E.1.1 Caudal medio anual.....</i>	<i>78</i>
<i>E.1.2 Precipitación Media</i>	<i>79</i>
<i>E.1.3 Evapotranspiración (ETP).....</i>	<i>79</i>
E.2 Determinación de la Temperatura del Agua en el Humedal Aspectos térmicos.....	79
E.3 Tablas de Resultados Temperatura media y Precipitación Media	81
ANEXO F: PRESUPUESTO ESTIMATIVO	85
ANEXO G: PLANOS	86

ANEXO A: BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

A.1 Eutrofización

La laguna lo Méndez está recibiendo constantemente entradas de agua desde su cuenca (entorno terrestre) y desde la atmósfera (entorno atmosférico), en consecuencia la calidad de sus aguas se encuentran dañadas producto de estos eventos, principalmente por las descargas de aguas pluviales que arrastran y acumulan materiales traídos por las corrientes de agua y por el aporte de nutrientes llevados por las aguas desde el cerro colindante a la laguna.

El fenómeno de eutrofización sucede naturalmente, pero puede ser acelerado por la intervención del hombre y se produce por el enriquecimiento en nutrientes de las aguas, fundamentalmente de nitrógeno y fósforo. Produce un crecimiento excesivo de algas, las cuales al morir se depositan en el fondo de los ríos o lagos, generando residuos orgánicos que al descomponerse consumen gran parte del oxígeno disuelto y de esta manera pueden afectar a la vida acuática y producir la muerte por asfixia de la fauna y flora, hasta el punto de matar el río o lago por completo. Las algas se desarrollan cuando encuentran condiciones favorables: temperatura, sol y nutrientes (Wright *et al*, 1999). El aumento del estado trófico de un sistema puede ser resultado de aportes externos como internos. La carga se genera a partir de materiales arrastrados por la acción de la precipitación y la erosión de la cuenca (Esteves, 1988).

Los principales factores que condicionan el grado de trofía de un cuerpo de agua son la disponibilidad de luz solar, factor determinante para la fotosíntesis, y la concentración de nutrientes.

A.2 Lagunaje

A.2.1 *Funcionamiento*

Los sistemas de lagunajes se pueden clasificar en :

a) Lagunas de estabilización aerobia

Son estanques de poca profundidad de hasta 1,5 m con tiempo de residencia hidráulica por lo general mayores a 20 días. Se caracterizan por mantener condiciones aerobias en toda su extensión. La depuración del agua residual se produce a través de un proceso natural, donde están

involucrados la utilización de algas y de bacterias.

b) Lagunas Facultativas

Las lagunas de facultativas de aguas residuales tienen profundidades de 1,5 a 2,5 metros. Se lleva a cabo mediante la acción de bacterias facultativas, anaerobias y aerobias. En las lagunas facultativas existen tres zonas: una zona superficial en la que existen bacterias aerobias y algas en una relación simbiótica análoga a la que ocurre en lagunas aerobias; una zona inferior anaerobia en la que se descomponen activamente los sólidos acumulados por acción de las bacterias anaerobias; y una zona intermedia, que es parcialmente aerobia y anaerobia, en la que la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas (Eddy, 1996). En la Figura A- 1:Procesos en una laguna facultativa se puede apreciar las diferentes zonas.

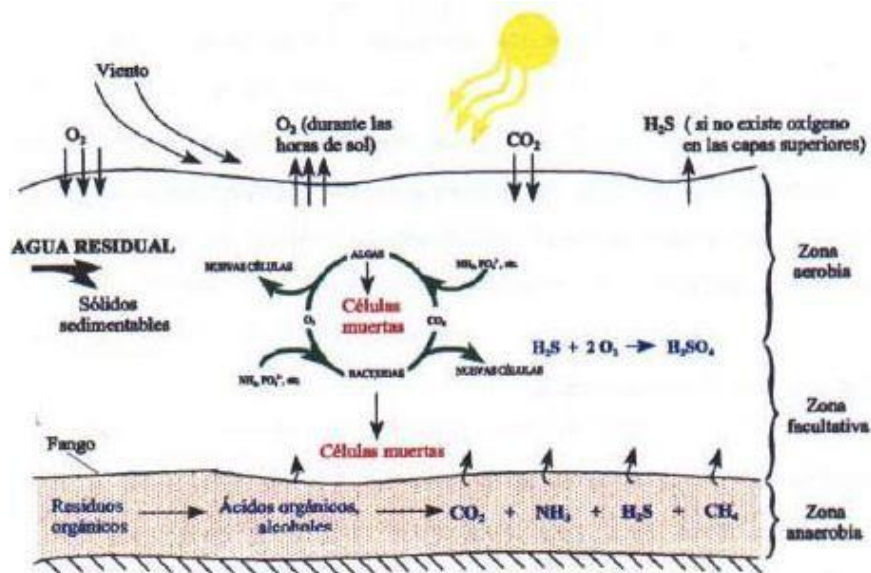


Figura A- 1:Procesos en una laguna facultativa

Fuente: (Eddy, 1996)

c) Lagunas de maduración

Son estanques de poca profundidad (0,5 a 1 m) con una alta producción de algas, tienen como objetivo fundamental la eliminación de bacterias patógenas. Además de su efecto desinfectante, las lagunas de maduración cumplen otros objetivos, como son la nitrificación del nitrógeno amoniacal, cierta eliminación de nutrientes, clarificación del efluente y consecución de un efluente bien oxigenado.

d) Lagunas anaerobias

Es un estanque profundo (2,5 a 5 m) que por lo general son anerobios en toda su profundidad, a excepción de pocos metros cercana a la superficie. La estabilización se consigue por medio de una combinación de precipitación y de conversión anaerobia de los residuos orgánicos en CO_2 , CH_4 , otros productos gaseosos finales, ácidos orgánicos y tejido celular. Estos tipos de laguna

permiten profundidades mayores, lo que implica menores requerimientos de terreno con respecto a las lagunas aerobias y facultativas. Es necesario mencionar que dada las características de la población microbiana y el hábitat en que se desarrollan, las lagunas anaeróbicas son especialmente sensibles a cambios en el pH y en la temperatura (Mendonça, 1990)..

A.2.2 Ventajas y Desventajas Ventajas :

- Bajo costo en la construcción.
- Necesidades energéticas nulas.
- Bajo costo en mantención, no requiere personal calificado.
- Pueden absorber cambios bruscos de cargas hidráulicas u orgánicas.
- Se integra bien en un medio rural por ser un proceso natural o casi natural. Absorbe fácilmente variaciones de cargas puntuales.

Desventajas:

Requiere de una gran cantidad de terreno.

Complejidad en la extracción de lodos.

Problemas ocasionados por la producción de olores.

Una vez construidas es muy complejo modificar las condiciones del proceso ante modificaciones de cargas y/o meteorológicas.

A.2.3 Eficiencia

La eficiencia en el tratamiento por lagunaje se define en la Tabla A- 1.

Tabla A- 1 : Eficiencia en el proceso de tratamiento por lagunaje

Parámetros	Eliminación (%)
DBO5	60-85
N	30-50
P	20-50
Sólidos Suspendidos	70-80

A.3 Filtros Percoladores

A.3.1 *Ventajas y desventajas*

Ventajas:

Estabilidad ante variaciones de la carga y concentración afluente.

Producción de un lodo estable concentrado, en general bien floculado y fácil de decantar. •

De fácil puesta en marcha luego de una detención.

Desventajas:

Necesidad de tratamiento primaria.

Riesgo de desarrollo de vectores sanitarios especialmente en climas cálidos o templados. •

Se pierde gran cantidad de energía al hacer pasar el agua por el medio filtrante.

A.3.2 *Eficiencia*

La eficiencia en el tratamiento mediante filtros percoladores se define en la Tabla A-2.

Tabla A- 2 : Parámetros de Depuración de los Filtros Percoladores

Parámetros	Eliminación (%)
Sólidos en Suspensión	80-90
DBO5	80-90
DQO	75-85
N	20-35
P	10-35

Fuente: (Eddy, 1996)

A.4 BIODISCOS

A.4.1 *Ventajas y Desventajas*

Ventajas

Es necesaria baja energía para accionarlos

Fácil operación.

Baja producción de lodos

Desventajas

Se requiere tratamiento primario

Altos costos de mantención, debido principalmente a fallas en los ejes.

Cada cierto tiempo se produce desprendimiento de la biopelícula, lo cual paraliza el proceso hasta que se produzca la recolonización.

A.4.2 *Eficiencia*

La eficiencia en el tratamiento mediante Biodiscos se define en la Tabla A- 3.

Tabla A- 3 : Eficiencia Biodiscos

Parámetros	Eliminación (%)
Sólidos en Suspensión	80-85
DBO5	80-90
N	15-50
P	10-25

Fuente: (Ramalho, 1996)

A.5 Humedales Artificiales

A.5.1 Elementos de un humedal

Los humedales artificiales subsuperficiales y superficiales son compuestos por agua, sustrato, vegetación emergente y otros componentes como los microorganismos e invertebrados acuáticos.

a) Agua

El agua es uno de los elementos más importantes de un humedal ya que para que pueda ser considerado como humedal debe estar presente casi permanentemente. Debido a su gran extensión y poca profundidad, a diferencia de otros ecosistemas acuáticos, los humedales poseen una fuerte interacción y dependencia con los procesos de evapotranspiración y precipitaciones. Estos procesos afectan su hidrología a veces de manera drástica e incluso pueden influir en su eficiencia para tratar aguas residuales.

b) Sustrato y restos de vegetación

Los materiales más comúnmente utilizados como sustrato en un humedal son las arenas y las gravas, además de los sedimentos y residuos que se van depositando a medida que el efluente circula lentamente por toda la superficie.

La importancia del sustrato en un humedal radica en el hecho que sirve de sustento para todos los seres vivos que habitan en él, incluyendo los microorganismos encargados del tratamiento de las aguas residuales. Asimismo, la impermeabilidad del humedal depende del sustrato que lo compone y del suelo que lo sustenta.

En los humedales las proporciones sumergidas de las hojas y tallos muertos se degradan y se convierten en lo que se llama restos de vegetación. La acumulación de restos de vegetación e sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre.

c) Vegetación

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (los tallos, raíces, y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión.

Efectos físicos: La vegetación distribuye y ralentiza la velocidad del agua lo que favorece

la sedimentación de los sólidos suspendidos y aumenta el tiempo de contacto con el agua y la vegetación. La vegetación origina un importante gradiente de luz, viento y temperatura desde el suelo hasta el límite superior de dicha vegetación, disminuyendo la velocidad del viento, la luz, y amortiguando los cambios de temperatura permitiendo temperaturas más cálidas en invierno y más frías en verano

En climas fríos la vegetación protege de la congelación, sobretodo en humedales subsuperficiales los cuales se han demostrado que pueden funcionar adecuadamente a temperaturas de -40°C .

Efectos sobre la conductividad hidráulica: Aunque inicialmente se proponía que las raíces de la vegetación favorecerían la conductividad hidráulica mediante su desarrollo y la creación de canales una vez las raíces muriesen, se ha comprobado posteriormente que la conductividad disminuye en la zona ocupada por las raíces lo que provoca un mayor flujo en las zonas más profundas

Eliminación de nutrientes: Algunos autores indican que cosechando la biomasa se elimina del orden del 20% del nitrógeno que proviene del influente, y que la mayor proporción de remoción de este contaminante se efectúa por desnitrificación (liberación de nitrógeno gaseoso por reducción microbiológica). Con respecto al fósforo, la cantidad que puede eliminarse del sistema por extracción de las plantas es menor, citándose cantidades del orden de miligramos por litro del agua residual. Otros autores calculan que la capacidad de las macrofitas para extraer nitrógeno y fósforo está en los intervalos de 200 a 2500 kg N/ha/año y 30 a 150 kg P /ha/año. (Fernández J. , 2005)

Superficie para la biopelícula. En sistemas superficiales los tallos y hojas sumergidos aumentan la superficie de la biopelícula encargada de la eliminación de los contaminantes, por lo que la cantidad de vegetación en el sistema debería estar relacionada con el rendimiento del mismo. En los sistemas subsuperficial son las raíces las que sirven de soporte para la biopelícula junto al material granular. Se espera que la biopelícula mejore los procesos ya que el funcionamiento del sistema depende de la abundancia de bacterias del mismo

En los humedales construidos se han utilizado una variedad de plantas emergentes semejantes a las encontradas en los humedales naturales. Las plantas que con más frecuencia se utilizan son: las espadañas o eneas (*Typha* spp.), la caña o junquillo (*Phragmites* spp.) y los juncos (*Juncus* spp.) (*Scirpus* spp.) y (*Carex* spp), en la Figura A-2 se esquematizan algunas de las plantas más comunes en humedales artificiales. Las plantas presentan varias propiedades que las hacen ser un componente indispensable en los humedales construidos. La función de mayor importancia de las macrofitas en relación con el proceso de tratamiento de las aguas residuales es el efecto físico que producen. Las macrofitas estabilizan la superficie del lecho proporcionando buenas condiciones para la filtración, previniendo las obstrucciones, además de proporcionar área superficial para el crecimiento de los microorganismos adheridos.

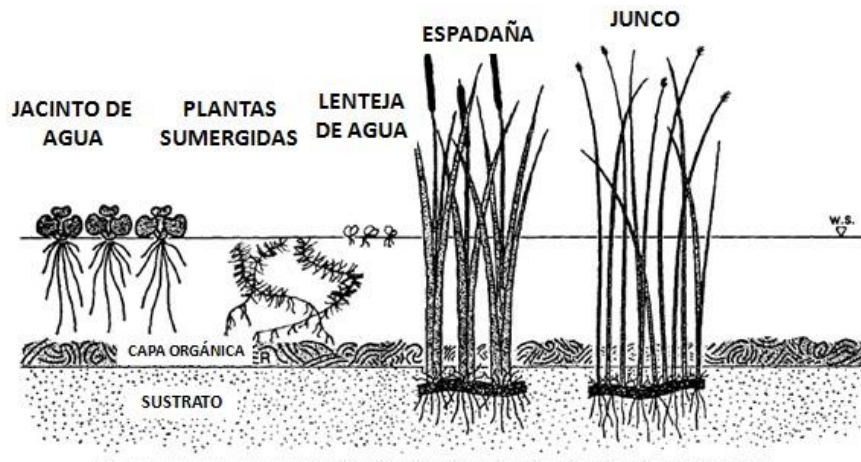


Figura A- 2:Plantas comunes en Humedales Artificiales

d) Microorganismos

La eficiencia de los humedales como sistemas de tratamiento está condicionada fundamentalmente por la actividad microbiológica que en ellos se lleva a cabo. Es por esto que, al diseñar y construir un humedal artificial, se debe tomar muy en cuenta la creación de un ambiente propicio para el crecimiento de los microorganismos. Los protozoos, las bacterias, hongos y levaduras son sólo algunos de los tipos de microorganismos que crecen en los humedales y que se encargan de tratar el agua residual, transformando un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en

sustancias inocuas o insolubles. Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y puede permanecer inactivo durante años.

e) Animales

Los humedales constituyen un hábitat natural para numerosas especies animales, especialmente invertebrados. Muchos de ellos contribuyen al tratamiento de las aguas residuales ya que descomponen la materia orgánica, incluso lo hacen en grandes cantidades y algunos ayudan mediante el consumo de pequeñas plagas de mosquitos y larvas. Otros animales son aves silvestres que auxilian agregando biodiversidad natural al sistema, pero en algunos casos se pueden considerar más bien como molestias a evitar en lo posible.

A.5.2 Remoción de los contaminantes

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual. Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza, patógenos y fósforo. Se presenta a continuación una breve descripción de los mecanismos de remoción de los contaminantes en humedales de flujo subsuperficial.

a) Materia en suspensión

Se denominan sólidos en suspensión a aquellos sólidos que quedan retenidos en un filtro estandarizado de tamaño de poro 1,2 μm . En los humedales se producen unos procesos físicos conocidos como filtración del medio granular consiguiendo así la eliminación de la materia en suspensión. Es muy efectiva en los dos tipos de humedales, ya que gran parte de la remoción ocurre en los primeros metros a la entrada debido a las condiciones tranquilas y a la poca profundidad del agua en el sistema. En los sistemas de flujo de agua libre (flujo superficial) los sólidos en suspensión se eliminan por mecanismos de floculación/sedimentación y filtración/intercepción. La sedimentación ocurre por efecto de la gravedad, y en condiciones ideales se rige por la ley de Stokes, que indica que la velocidad de sedimentación es proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula e

inversamente proporcional a la viscosidad del fluido (Lara, 1999). En los sistemas de flujo sub-superficial la remoción de sólidos en suspensión es muy eficaz debido a que la velocidad del flujo del afluente es baja y hay una gran superficie proporcionada por el lecho de arena y grava. Estos sistemas actúan como filtros horizontales, lo que facilita los procesos de sedimentación, floculación y adsorción.

b) Remoción de Nitrógeno.

La nitrificación/desnitrificación es la principal vía para remover nitrógeno. Remociones desde 60 a 86 por ciento. Los humedales artificiales alimentan el proceso de desnitrificación usando fuentes de carbón derivadas de la biomasa producida dentro del humedal. Las remociones de nitrógeno (NKT) que han sido reportadas para tiempos de retención de 5 a 7 días generalmente producen un efluente con NKT menor a 10 mg/L .

c) Remoción de la materia orgánica

Los procesos que conducen a la remoción de la materia orgánica son de dos tipos: físicos y biológicos. Para la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida, debido a la poca velocidad en los sistemas de flujo libre y la deposición y filtración de sistema subsuperficial, mientras que en los procesos biológicos intervienen organismos vivos (micro y macroscópicos) e influyen de manera drástica factores como la disponibilidad de oxígeno, el pH del medio, y la temperatura. . La DBO que se encuentra en forma soluble es removida mediante la degradación biológica realizada por los microorganismos adheridos a la superficie de las plantas y los detritos, así como por los microorganismos que se encuentran en la columna de agua, como sucede en los sistemas con flujo libre o los que se encuentran adheridos al medio soporte en los sistemas con flujo subsuperficial. En estos procesos se pueden dar reacciones de oxidación/reducción, hidrólisis y fotólisis, que conducen a la biodegradación de la materia orgánica. Por otra parte, las bajas velocidades que se producen en el sistema, así como la presencia de las plantas y del medio soporte para el caso de los sistemas con flujo subsuperficial, hacen que se favorezca la filtración, floculación y sedimentación de la materia orgánica que se encuentra en forma suspendida. Los sólidos orgánicos removidos por sedimentación y filtración, así como la vegetación muerta ejercerán una demanda de oxígeno. Como resultado, la DBO afluente al humedal se remueve rápidamente a medida que el agua avanza en el sistema.

c) Remoción del fósforo

La remoción de fósforo en la mayoría de los sistemas de humedales artificiales no es muy eficaz, Los mecanismos de eliminación suelen ser de tipo biótico, asimilación por parte de las plantas y microorganismos, y abiótico, que incluye la adsorción por el medio granular (Lara, 1999). La pérdida de adsorción del material granular reduce la buena eficiencia inicial de eliminación del fósforo. Una buena manera de aumentar la capacidad de retención del fósforo es usar arena en lugar de la grava, pero este medio requiere instalaciones muy grandes, debido a la reducida conductividad hidráulica de la arena comparada con la grava. Si es requisito del proyecto una importante remoción de fósforo, se necesitará entonces un área de terreno muy grande o métodos de tratamiento alternativos.

A.6 Modelo para el diseño de humedales artificiales subsuperficiales.

En la literatura especializada existen varios modelos matemáticos para diseñar humedales de flujo subsuperficial, en donde principalmente coinciden basándose en la hipótesis en considerar los humedales como reactores biológicos, cuyo rendimiento se puede aproximar al descrito por la cinética de primer orden de flujo pistón. Bajo este criterio se puede determinar las dimensiones del humedal y estimar las eficiencias de remoción de la demanda bioquímica de de oxígeno (DBO), nitrógeno, fósforo, sólidos totales y coliformes fecales. Los dos principales modelos utilizados mayoritariamente a nivel internacional son los propuesto por Reed et al. y el modelo de Kadlec et al. (Lara J, 2005) Reed y colaboradores propusieron ecuaciones en las que se consideran las constantes de reacción por unidad de volumen dependientes de la temperatura (Reed *et al* , 1995), en cambio Robert Kadlec y Robert Knight consideraron constantes de reacción por unidad de superficie en las que la temperatura sólo tiene importancia en la eliminación de nitrógeno y materia en suspensión (Kalec & Knight, 1996).

A.6.1 Modelo General de diseño

Para la obtención de las ecuaciones de diseño se supone que los humedales se comportan como reactores de flujo ideal en pistón en los cuales los contaminantes se degradan siguiendo modelos cinéticos de primer orden. Por tanto se tiene:

$$\frac{dC}{dt} = -K_t * C \quad \text{Ec. (1A)}$$

Donde,

C la concentración del contaminante, en mg/L.

K_t la constante de cinética de primer orden, en días⁻¹. El signo negativo en la expresión indica que la concentración de contaminante disminuye a lo largo del tiempo.

Si se integra la ecuación 1^a entre la concentración inicial de contaminante o afluente (C_0 para $t=0$) y la final o efluente (C_i para $t=t$, siendo este último el tiempo medio de retención hidráulico, en días) se obtiene la ecuación 2A:

$$\frac{C_i}{C_0} = e^{-K_t * t} \quad \text{Ec. (2A)}$$

Por otro lado el tiempo medio de retención hidráulico es:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{\epsilon * A_s * y}{Q} \quad \text{Ec.(3A)}$$

Siendo,

V: Volumen del humedal, en m³.

ϵ : Porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal, en tanto por uno. A_s : Superficie del humedal, en m².

Y: Profundidad media del humedal, en m.

Q: Caudal medio a través del humedal, en m³/d.

$$Q = \frac{Q_o - Q_i}{2} \quad \text{Ec. (4A)}$$

Donde, Q_o es el caudal de salida y Q_i es el caudal de entrada, ambos en m³/d.

La anterior expresión sirve para calcular el caudal medio debido a las precipitaciones y evapotranspiración que se producen en el flujo del agua a lo largo del humedal.

Para un diseño preliminar de la superficie es razonable suponer que los caudales de

entrada y salida son iguales. Combinando las ecuaciones (2A) y (3A) se obtiene la ecuación (5A):

$$As = \frac{Q \cdot \ln \frac{Co}{Ci}}{Kt \cdot \epsilon \cdot y} \quad \text{Ec. (5A)}$$

Como se describirá a continuación, el valor de Kt para las ecuaciones (2A) y (5A) depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura.

Kt dependiente del contaminante a eliminar y la temperatura. Está dado por la ecuación:

$$K_t = K_R * \theta_R^{(T_w - T_R)} \quad \text{Ec. (6A)}$$

Donde,

KR: Constante de reacción a la temperatura de referencia (20 °C) en 1/d.(Tabla A-4) Tw:

Temperatura del agua considerada en el dimensionado, en ° C.

TR: Temperatura de referencia con la que se ha calculado el coeficiente θR, en ° C. θR :

Coeficiente de temperatura, adimensional. (Tabla A-4)

Tabla A- 4: Coeficientes de Temperatura y Constantes de Reacción para 20°C.

Parámetro	DBO5	NH4	NO3	Coliformes fecales
K_R, d⁻¹	1,104	0,01854+0,3922·(hrz) ^{2,6077}	1	2,6
θ_R, adim.	1,06	1,048	1,15	1,19

Nota: Las temperaturas de aplicación deben ser superiores a 1° C. hrz es la profundidad del lecho ocupado por la rizosfera.

De la ecuación (5A), despejamos Ci y se obtiene la concentración del contaminante en el efluente:

$$C_i = \frac{C_o}{e^{\frac{Kt \cdot A_s \cdot \gamma \cdot \epsilon}{Q}}} \quad \text{Ec. (7A)}$$

Remoción de los sólidos suspendidos:

La eliminación de la materia en suspensión viene dada por las ecuaciones (8A) y (9A), donde HLR es la carga hidráulica.

$$\text{SFS: } C_o = C_i (0,1058 + 0,0011 \text{ HLR}) \quad \text{Ec. (8A)}$$

$$\text{FWS: } C_o = C_i (0,1139 + 0,00213 \text{ HLR}) \quad \text{Ec. (9A)}$$

$$\text{HLR} = \frac{100 \cdot Q_s}{A_s} \quad \text{Ec. (10A)}$$

En la eliminación de coliformes fecales se tendrán en cuenta los microorganismos indicadores mediante la ecuación (11A).

$$C_o = \frac{C_i}{(1+t \cdot Kt)^n} \quad \text{Ec. (11A)}$$

Donde,

C_o y C_i son las concentraciones de salida y entrada respectivamente y n el número de tanques en serie.

Los valores de KT se pueden obtener a partir de los datos expuestos en la Tabla

A4. En la eliminación del fósforo total, se utiliza la ecuación:

$$C_o = C_i * e^{-Kp/HLR} \quad \text{Ec. (12A)}$$

Donde, Kp es la constante de reacción, con un valor de 2,73 cm/d.

Para conseguir un diseño válido se tomará en cuenta consideraciones hidráulicas y térmicas, así como la cinética de la remoción.

A.6.2 *Diseño térmico.*

Los mecanismos térmicos que afectan los humedales de flujo subsuperficial son la conducción de/hacia el terreno, conducción de/hacia el agua residual, conducción, radiación y convección de/hacia la atmósfera. Las ganancias de calor sobre el terreno suelen no ser tenidas en cuenta para un diseño más conservador. En cuanto al calor recibido por radiación solar, si despreciarlo en los meses fríos es también conservador, en los meses de verano y en lugares muy calurosos puede llegar a ser significativo. Las pérdidas por convección producidas por el viento no deberían ser relevantes si el humedal SFS tiene una buena densidad de vegetación, una capa de restos de vegetación y una capa superior con grava relativamente seca (Lara, 1999).

La energía ganada por el flujo del agua a través del humedal puede preverse aplicando la ecuación:

$$q_g = c_p * \delta * A_s * y * n \quad \text{Ec.(13A)}$$

Siendo,

q_g : Energía ganada por el agua J/°C

c_p : capacidad de calor específico del agua, J/kg* ° C

δ : densidad del agua, kg/m³

A_s : área superficial del humedal, m².

y : profundidad del agua en el humedal, m. n : porosidad del humedal.

El calor perdido por el humedal puede ser conocido aplicando la ecuación:

$$q_l = (T_o - T_a) * U * \sigma * A_s * t \quad \text{Ec. (14A)}$$

Donde,

q_l : Energía perdida vía conducción a la atmósfera, J.

T_o : temperatura del agua que entra al humedal, ° C.

T_a : temperatura del aire promedio durante el período considerado.

σ : factor de conversión, 86400 s/d

A_s : área superficial del humedal, m².

t : tiempo de residencia hidráulica en el humedal, d.

U : coeficiente de transferencia de calor a la superficie del lecho del humedal, W/m². Viene dada por la ecuación:

$$U = \frac{1}{\frac{y_1}{k_1} + \frac{y_2}{k_2} + \dots + \frac{y_n}{k_n}} \quad \text{Ec.(15A)}$$

Donde,

$k(n-1)$ = conductividad de las capas 1 a n. (W/m* ° C)

$y(n-1)$ = espesor de las capas 1 a n (m.).

El valor de T_a se obtiene de los registros de la estación meteorológica. Se utilizan los datos de temperatura de los días más fríos de para realizar el promedio.

En la Tabla A-5 se encuentran estipulados los valores de conductividad de los materiales presentes en un humedal superficial, estos valores han sido bien establecidos a excepción de la capa de restos de vegetación. Este valor de restos de vegetación se considera conservador.

Tabla A- 5:Conductividad Térmica de los Materiales en el Humedal Superficial

Material	K (W/m*°C)
Aire (sin convección)	0,024
Nieve (nueva o suelta)	0,08
Nieve (de largo tiempo)	0,23
Hielo (0°C)	2,21
Agua (0°C)	0,58
Capa de restos de vegetación	0,05
Grava seca (25 % de humedad)	1,5
Grava saturada	2
Suelo seco	0,8

El cambio de temperatura en el humedal (T_c), referida a las pérdidas y ganancias de calor, se puede calcular mediante la ecuación:

$$T_c = \frac{q_l}{q_g} \quad \text{Ec.(16A)}$$

Finalmente, se obtiene la temperatura del efluente (T_e) y la temperatura promedio del agua (T_w) de los dos humedales de flujo subsuperficial mediante las ecuaciones:

$$T_e = T_o - T_c \quad \text{Ec(17A)}$$

$$T_w = \frac{T_o + T_e}{2} \quad \text{Ec. (18A)}$$

A.6.3 *Diseño hidráulico*

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. Todos los diseños que se asumen actualmente asumen condiciones de flujo a pistón y además no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento.

El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia viene impuesta por se debe a las raíces de las plantas y los sólidos acumulados. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema.

Para vencer esta resistencia se proveerá de una inclinación en el fondo del humedal suficiente para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel de agua.

La relación largo-ancho tiene gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia del flujo del sistema. En teoría grandes relaciones largo:ancho 10:1 o mayores asegurarían un flujo a pistón, pero tienen el gran inconveniente de que en la parte alta desbordan debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas superficiales. Por lo tanto relaciones de 1:1 hasta 4:1 son aceptables. Los cortocircuitos pueden ser minimizados con una cuidadosa construcción y mantenimiento del fondo del humedal, con el uso de múltiples celdas y con intercalación de zonas abiertas (sin vegetación) para la distribución del flujo (Lara, 1999).

La ley de Darcy, que está definida en la ecuación (18A), describe el régimen de flujo en un medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de humedales SFS. Éstos asumen condiciones de flujo laminar, pero el flujo turbulento puede darse con gravas muy gruesas cuando el diseño utiliza un gradiente hidráulico alto. La ley de Darcy también asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, pero en la realidad puede variar por la precipitación, evaporación y filtración; así como por los cortocircuitos. Si el sistema está diseñado para tener una mínima dependencia del gradiente hidráulico y si las pérdidas y ganancias del sistema están adecuadamente reconocidas, la ley de Darcy puede dar una aproximación razonable a las condiciones

hidráulicas en el humedal SFS. En las ecuaciones se encuentran los pasos preliminares que dan lugar a la ley de Darcy.

$$v = K_s * s \tag{19A} \quad \text{Ec.}$$

$$v = \frac{Q}{W*y} \tag{20A} \quad \text{Ec.}$$

$$Q = k_s * A_s \frac{dh}{dL} \tag{21A} \quad \text{Ec.}$$

Donde,

ks: Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección del flujo, m³/m²·dia

Ac: Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m².

v: Velocidad de “Darcy”, la velocidad del flujo aparente a través de la totalidad del área de sección transversal del lecho, m/d.

dh: Pérdida de carga hidráulica a través del material poroso, m. dL: longitud del lecho, m.

La resistencia al flujo en los humedales SFS está causada principalmente por el material granular. Además a lo largo del tiempo, la extensión de las raíces a lo largo del lecho y la acumulación de residuos no degradables en la grava también añaden resistencia. La energía requerida para salvar esta resistencia viene dada por una diferencia de carga entre la superficie de la entrada y la salida del humedal. Esta diferencia será salvada construyendo el humedal con pendiente suficiente en el fondo.

Tabla A- 6: Órdenes de Magnitud de la Conductividad Hidráulica (Ks) en Función del Tipo de Material Granular Utilizado como Substrato en un Humedal Construido de Flujo Subsuperficial.

Tipo de material	Tamaño efectivo D10(mm)	Porosidad(%)	Conductividad hidráulica ks(m ³ /m ² /d)
Arena gruesa	2	28-32	100-1000
Arena gravosa	8	30-35	500-5000

Grava fina	16	35-38	1.000-10.000
Grava media	32	36-40	10.000-50.000
Roca gruesa	128	38-45	50.000-250.000

Utilizando la ley de Darcy y organizando los términos antes citados, se desarrolla la ecuación que permite calcular el ancho mínimo de una celda de humedal SFS que sea compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño.

$$W = \frac{1}{y} * \sqrt{\frac{Q_{med} * A_s}{m * K_s}} \quad \text{Ec. (24A)}$$

Siendo m la pendiente del fondo del lecho en tanto por 1 y Qmed el caudal promedio a través del humedal.

A.7 Evapotranspiración

La evaporación combinada de la superficie del suelo y la transpiración de las plantas, es a lo que se llama evapotranspiración. Representa el transporte de agua de la última capa superior terrestre a la atmósfera, es decir es el fenómeno inverso de la precipitación.

A la fecha, no existe método exacto ni científicos para determinar la evapotranspiración, sin embargo algunos investigadores han desarrollado métodos empíricos los cuales permiten calcular la evapotranspiración potencial.

El método de la determinación de la Evapotranspiración potencial según Thornthwaite, está relacionada con la obtención de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en relación a la duración astronómica del día y el número de días del mes .

Se propone las formulas para determinar la Evapotranspiración mensual.

$$e = \frac{16 * (10 * tm)^a}{I} \quad \text{Ec. (25A)}$$

Donde:

e=Evapotranspiración media mensual sin corregir

en mm, tm=Temperatura media mensual (°C),

α := constante, viene dada por la expresión:

$$a = 6,75 * 10^7 I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,792 * 10 * I^{-2} + 0,49239 \quad \text{Ec. (26A)}$$

I=Índice de calor anual, a partir de la expresión:

$$I = \sum i_j \quad \text{Ec. (27A)}$$

Donde, i_j = índice de calor mensual

$$i_j = \left(\frac{tmi}{5}\right)^{1,514} \quad \text{Ec. (28A)}$$

La evapotranspiración Real o corregida viene dada por ecuación:

$$ETP = e * f \quad \text{Ec (29A)}$$

Donde :

e= Evapotranspiración media mensual sin corregir

f= Factor de corrección por latitud. (Tabulado, ver Anexo E (Tabla 6E))

Se determinó la temperatura media que fueron obtenidos a partir de los datos proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile, se tomó como referencia la última década (2001-2011). A partir de esto utilizando las ecuaciones (25A), (26A), (27A), y (28A) se determinó la Evapotranspiración media ocurrida en la zona (Tabla A-3 y (Figura 11).

Tabla A- 7: Evapotranspiración Media Mensual (2001-2011)

Evapotranspiración Media Mensual (2001-2011)					
Mes	Temperatura media	i	e	f	ETP
Enero	16,4	6,03	25,98	1,24	32,22
Febrero	15,9	5,79	25,70	1,05	26,99
Marzo	14,6	5,05	24,81	1,06	26,30
Abril	11,8	3,68	22,86	0,84	19,21
Mayo	10,1	2,91	21,52	0,89	19,15
Junio	9,5	2,64	20,99	0,81	17,00
Julio	8,9	2,41	20,50	0,86	17,63
Agosto	9,1	2,46	20,61	0,94	19,37
Septiembre	9,8	2,79	21,28	1	21,28
Octubre	11,8	3,65	22,82	1,14	26,02
Noviembre	13,6	4,53	24,13	1,18	28,47

Diciembre	15,4	5,49	25,35	1,26	31,94
	Σ	47,43		ETP media	23,80

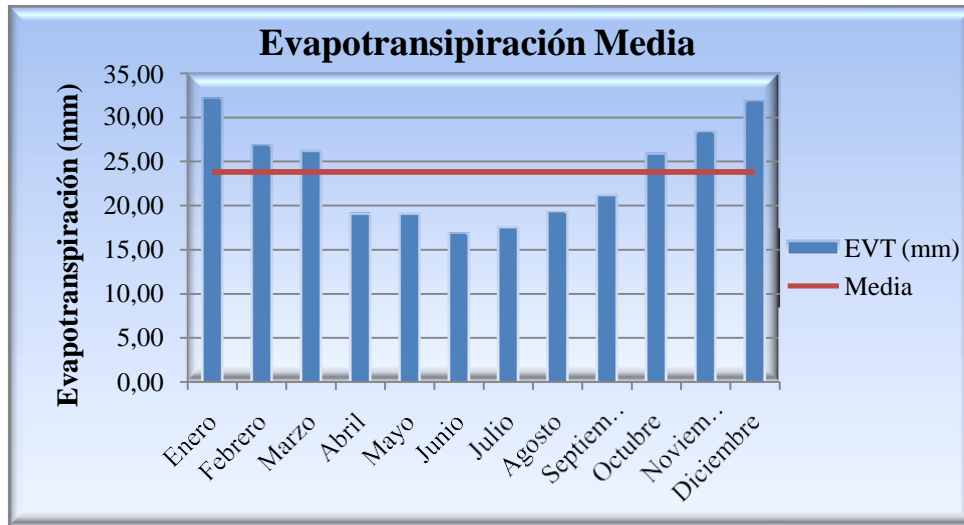


Figura A-3: Evapotranspiración media mensual

(2000-2011) A.8 Pérdidas de carga

Se consideraron las pérdidas de carga por singularidades y por fricción discretizando entre los tramos según corresponde (cambio de diámetro o materialidad).

A.8.1 Pérdidas de carga singulares

Para determinar las pérdidas de carga por singularidades es necesario discretizar entre el tramo de tubería de acero y el de HDPE, debido a que estos tienen diferentes diámetros.

Las pérdidas de carga singulares se calculan de acuerdo a los coeficientes de las piezas especiales, aplicadas a la altura de velocidad respectiva, según la siguiente expresión:

$$= \frac{\sum K_i}{2g} \cdot V_i^2 = \frac{8 \cdot \sum K_i \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^4}$$

Ki = Coeficiente de resistencia para cada pieza especial. Vi = Velocidad de escurrimiento (m/s)

Q= caudal (m3/s) D= Diámetro de tramo línea de impulsión (m)

Ec (30A)

También cabe destacar que se consideraron los efectos que producen los caudales de diseño, puesto que estos son diferentes para el escenario inicial y el proyectado, generando cambios considerables en los resultados de pérdidas singulares.

A continuación en la Tabla A-8 se muestran los valores de coeficientes K y pérdidas singulares calculadas tanto para la situación inicial como futura.

Tabla A- 8: valores de coeficientes K y pérdidas singulares

COEFICIENTE K EN PÉRDIDAS SINGULARES	
Singularidad	K
Salida bombas	1
Codo 1/4	0.3
Válvula retención	2.5
Válvula de compuerta	2
Reducción	1.5
Cruz	1.8
Ventosa	1.5
Conexión descarga	1
Medidor caudal	1.5
Codo 1/8	0.2
TEE	1.8
Codo 1/16	0.1

A.8.2 *Pérdidas de carga regulares*

Para determinar las pérdidas de carga regulares es necesario discretizar entre el tramo de tubería de acero y el de Hdpe, debido a que estos tienen diferentes rugosidades y diámetros internos. También se debe considerar los efectos que producen los caudales de

diseño, puesto que estos son diferentes para el escenario inicial y el proyectado.

El cálculo de la pérdida de carga friccional se determina a partir de la fórmula de Hazen-Williams, cuya representación matemática es la siguiente:

$$J = 10.665 * \frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.869}}$$

Donde:

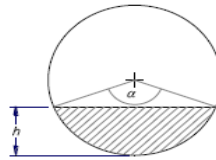
J = Pérdida de carga unitaria (m/m). Q= Caudal de escurrimiento (m³/s).

D= Diámetro interior de la línea de impulsión. C= Coeficiente de rugosidad.

A.9 Dimensionamiento de tubería

A.9.1 Ecuaciones de Escurrimiento

Geometría de la sección:



$$Am = \frac{D^2}{8} (\alpha - \text{sen}\alpha) \quad \text{Ec}$$

. (32A)

$$Pm = \frac{\alpha}{2} D \quad \text{Ec. (33A)}$$

$$\frac{h}{D} = \frac{1 - \cos(\frac{\alpha}{2})}{2} \quad \text{Ec.(34A)}$$

Am:Área de mojada (m²),

Pm:Perímetro mojado (m),

α: Ángulo (rad).

A.9.2 Ecuación de Chezy-Manning

Para la verificación de la capacidad de escurrimiento de las secciones adoptadas en el diseño, se ha procedido a verificar una sección circular mediante la ecuación de Manning.

$$Q = \frac{A_m \cdot \sqrt{m}}{P_m \cdot n} \quad \text{Ec. (35A)}$$

Donde:

Q: Caudal (m³/s),

M: Pendiente longitudinal (m/m),

A_m: Área de mojada (m²),

P_m: Perímetro mojado (m),

n: Coeficiente de Manning.

ANEXO B: METODOLOGÍA DE CALIFICACIÓN DE CADA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO ANTE CADA CRITERIO

B.1 Justificación de los Criterios

En cuanto a la justificación de los valores de los pesos se determina lo siguiente:

Muy importante (5):

- La integración en el medio debe tener la máxima ponderación ya que es primordial no alterar la naturaleza ni el entorno paisajístico de la laguna, además forma parte los objetivos fundamentales de este trabajo.
- Los rendimientos en la remoción de los contaminantes tomarán una importancia media, ya que la carga a tratar no es tan alta como lo son las aguas residuales domiciliarias.
- El sistema de tratamiento no debe abarcar una extensa área, ya que la superficie a construir es limitada.

Importancia media (3):

- Los criterios como el ruido e insectos también se considerarán con una importancia media, debido a que las alternativas a evaluar no presentan excesivamente grandes intensidades de ruido.
- Se priorizará la no aparición de insectos, para así evitar molestias en los visitantes ..
- Se hace fundamental que la estabilidad del sistema tenga importancia media, en donde se enfrentará a grandes cambios en el caudal, ya que ésta dependerá de la frecuencia y de la intensidad de las precipitaciones, además también estará expuesta a las variaciones en la carga contaminante presente en las aguas a tratar.

Baja importancia (1):

- Las Obras civiles y requerimientos de equipos tomarán una baja importancia, sólo por considerar con mayor prioridad a los demás criterios.

B.2Puntuación de los criterios

A partir de la descripción de cada criterio se procedió a calificar cada uno de éstos de manera cualitativa y transformarla en cuantitativa en una escala del 1 al 10. Cabe destacar que los datos y escalas a utilizar están extraídos de la literatura.

a) **Simplicidad de construcción**

Está evaluado cualitativamente como se muestra en la Tabla B- 1y sólo se plantean 3 valoraciones: muy sencillo, sencillo o complicado.

Tabla B- 1 : Valoración de Cada Alternativa en la Simplicidad en la Construcción

Parámetro	Simplicidad en la construcción					
	Lagunaje	Humedal Art. Superficial	Humedal Art. Subsuperficial	Sistema de Filtros	Filtros Percoladores	Bíodiscos
Obra civil y requerimiento de equipos	MS	MS	MS	S	C	MC

Muy Complicado: MC=3
,1992)

Simple: S=8

Fuente: (Collado

Complicado: C=5

Muy Simple: MS=10

b) **Rendimientos**

La: Tabla B- 2 muestra el rendimiento donde se evaluaron 2 criterios correspondientes a la eficiencia que puede presentar cada alternativa en relación a de la DBO y a los sólidos suspendidos. Para ello se propondrá una escala del 1-10 en relación a cada porcentaje de remoción para cada contaminante.

Tabla B- 2: Valoración de Cada Alternativa en los rendimientos

Parámetro	Rendimientos				
	Lagunaje	Humedal Art. Superficial	Humedal Art. Subsuperficial	Filtros Percoladores	Bíodiscos
DBO	60-85	85-95	85-95	80-90	80-90
N	30-50	35-50	35-50	20-35	15-50
P	20-50	20-35	20-35	10-35	10-25
SST	70-80	85-95	85-95	80-90	80-90

Tabla B- 5: Valoración de Cada Alternativa Ante los Efectos en el Medio Ambiente

Parámetro	Medio Ambiente					
	Lagunaje	Humedal Art. Superficial	Humedal Art. Subsuperficial	Sistema de Filtros	Filtros Percolador	Bíodisco
Integración con el medio	B	B	B	N	M	M

Mala M=4
 Collado, 1992
 Normal N=7
 Buena B=10

Fuente:

f) Impacto Social

En la Tabla B- 6 se muestra el comportamiento de ruidos e insectos que pueden afectar la salud y la aceptación de la comunidad visitante.

Tabla B- 6: Valoración de Cada Alternativa en el Impacto social

Parámetro	Impacto Social					
	Lagunaje	Humedal Art. Superficial	Humedal Art. Subsuperficial	Sistema de Filtros	Filtros Percolador	Bíodisco
Ruidos	I	I	I	I	A	A
Insectos	N	F	A	F	A	I

Frecuente F=3 Atípico A=8
 Collado, 1992
 Normal N=5 Inexistente I=10

Fuente:

ANEXO C: ESPECIFICACIONES GENERALES EN LA CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENCIÓN DEL HUMEDAL SUBSUPERFICIAL

C.1 Especificaciones Generales en la construcción

Los aspectos más importantes a tener en cuenta para la construcción de humedales para son básicamente, la impermeabilización de la capa superficial del terreno, la selección y colocación del medio granular el establecimiento de la vegetación, y por último las estructuras de entrada y salida.

A continuación se detallan tanto los materiales a utilizar como las instrucciones para realizar la construcción de la planta de depuración mediante humedales artificiales, como también incluye las labores preliminares a realizar.

C.1.1 Limpieza y establecimiento de una plataforma de trabajo.

Con esta actividad se da inicio a la construcción del sistema de tratamiento. Su finalidad es la de retirar diversos objetos existentes y la capa vegetal superficial (aproximadamente 0,2 m de espesor) que se encuentren en el sitio donde se construirá la instalación con el fin de mantener libre de obstáculos la zona de trabajo (40 m x 60 m). También incluye el acondicionamiento y transporte de todo el material recogido. El resultado final de las actividades de despeje y limpieza será la obtención de la plataforma de trabajo.

C.1.2 Trazado y replanteo.

Se refiere al trazado y replanteo del área a construir que se realizará y verificará durante el tiempo que dure la construcción. Una vez conformada la plataforma de trabajo se realiza el replanteo del tratamiento completo según las dimensiones y cotas especificadas en el plano adjuntado en el de planta y corte mostrados en el anexo G, utilizando indicadores (estacas y tiza en polvo por ejemplo) que señalen los puntos más singulares e importantes de la construcción, que sirven a su vez para marcar las cotas básicas de la excavación y para determinar la línea piezométrica de la instalación.

C.1.3 Excavación y movimiento de tierras.

Una vez definida en el terreno la ubicación de cada elemento de la instalación, se procede a excavar. La excavación se realiza según las medidas especificadas en el plano de planta y corte. También se realizan las excavaciones para la cámara decantadora, y la cámara de control.

Es importante que el material extraído no obstruya ni el perímetro de la plataforma de trabajo ni el acceso abierto para el transporte. Por otro lado, se va a necesitar una pequeña parte del material extraído para futuros rellenos, por lo que tampoco es conveniente llevar todo el material muy lejos.

C.1.4 Disposición de tuberías

Una buena opción para favorecer el rendimiento en la eliminación de contaminantes, sobre todo de microorganismos patógenos, consiste en circular el flujo por la máxima variedad de zonas, es decir, maximizar el número de reacciones que se producen en el flujo circulando el agua por diferentes medios. Es por esto, se hace primordial para la correcta operación del humedal una buena distribución del agua lluvia con el fin de conseguir evitar la colmatación y futuros cortocircuitos. El agua entrará al humedal subsuperficial por una tubería de distribución de material PVC 200 mm de diámetro que ocupa todo el ancho del humedal, ésta abastecerá a las tuberías de las mismas características que se dispondrán a lo largo del humedal, siendo éstas ubicadas de acuerdo a las especificaciones del plano (Anexo G). Las tuberías estarán perforadas por agujeros del mismo diámetro equidistantes espaciadas cada 0,2m, con una diámetro de 18mm (ver detalle en Planos Anexo G).

En la tuberías de salida de facilita el drenaje con una tubería perforada que ocupe como en la entrada, todo el ancho del humedal, controlando la altura, y una vez fijada, el agua se dispondrá a salir por el empuje provocado por el agua del humedal. También es el método a utilizar cuando se necesite vaciar el humedal.

C.1.5 *Impermeabilización*

Los humedales requieren generalmente que se coloque una barrera impermeable para impedir que se contamine con agua residual el subsuelo o el agua subterránea. Previa compactación del suelo, se colocará una polietileno grueso sobre las paredes y el fondo del lecho de 0,2 mm de espesor, con el fin de que no pueda ser dañada por el peso del medio granular, ni las raíces de las plantas.

C.1.6 *Plantas*

La plantación será *Carrizos (phragmites australis)* ha de realizarse como la última fase del proyecto constructivo y se realiza cuando se haya probado el funcionamiento de toda la instalación. El establecimiento de la vegetación se realizará a través de la multiplicación vegetativa a partir de rizomas, ya que este es el método más habitual y consiste en el troceado de los mismos en fragmentos de unos 5 cm. de longitud. Las plantas han de disponer de una profundidad suficiente para que las raíces estén en contacto con el agua, plantándose con una densidad de unos 5 trozos/m². La cobertura vegetal se irá consolidando espontáneamente a lo largo del primer año

C.1.7 *Medio granular*

En la elección del tipo de grava es importante tener en cuenta la porosidad y la granulometría. De la porosidad depende la superficie disponible para la formación de la capa bacteriana, ya que a más porosidad se reduce el área disponible. En cuanto a la granulometría, a mayor tamaño de la partícula, la capacidad hidráulica del biofiltro aumenta, pero disminuye la eficiencia en la remoción de contaminantes no únicamente al tener menos área para el crecimiento bacteriano, sino que se ve afectados los mecanismos como la adsorción, filtración, sedimentación e intercambio iónico. Por tal razón, la elección del tamaño de la grava debe conseguir el equilibrio entre los aspectos hidráulicos y la eficiencia de remoción (García *et al* , 2004).

Es por esto, que es importante disponer de un material suficientemente homogéneo en forma y tamaño, duro, durable, capaz de mantener su forma a largo plazo y limpio (sin presencia de finos). Por lo tanto, posteriormente a la colocación del geotextil en este caso

se resuelve a favor de una grava un poco más gruesa tendiendo a una conductividad hidráulica mayor, por lo tanto se procede a colocar cuidadosamente de manera de no dañar el geotextil una capa de grava 25mm. Por último, sobre la capa de grava se instala una capa de suelo vegetal de 0,15 m.

C.2 Operación y Mantenimiento

La operación y el mantenimiento del humedal consisten en el control hidráulico y de la profundidad del agua, la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, la poda de la vegetación, el manejo de la vegetación del humedal y el seguimiento rutinario.

C.2.1 Inspecciones iniciales y pruebas

El humedal deberá ser inundado y todos los componentes deben ser probados exhaustivamente para asegurarse de que están funcionando correctamente a través de la comprobación de los niveles de agua y la búsqueda de alguna fuga en los empalmes las tuberías sobre todo en la entrada.

El inicio del sistema comprende la provisión y plantación de los humedales y su mejor funcionamiento comenzará en el período que el suelo, plantas y microorganismos puedan adaptarse a las condiciones hidrológicas en el humedal. Al igual que todos los sistemas vivos, los humedales están en mejores condiciones para tolerar el cambio si se les ha permitido un periodo inicial de estabilización.

C.2.2 Operación y control

La profundidad del agua en el humedal puede requerir ajuste periódico según sea la estación o en respuesta al aumento a largo plazo. La presencia de mosquitos no se debiera dar a medida que la superficie del agua se mantenga debajo de la superficie superior del medio.

El manejo de la vegetación en estos humedales no incluye la poda rutinaria y disposición del material podado. La remoción de contaminantes por parte de la vegetación es un mecanismo relativamente insignificante de manera que el corte y la remoción rutinaria de la vegetación no proporcionan un beneficio significativo en cuanto al tratamiento.

Se requiere un seguimiento rutinario de la calidad del agua en los humedales. El muestreo será normalmente al agua residual no tratada (entrada del tanque de sedimentación) y al efluente final del sistema (salida del tanque de recolección de agua tratada). Esto permitirá que el operador tenga un mejor entendimiento del desempeño del humedal y le proporcione la base para hacer ajustes de ser necesarios (EPA, 2000).

C.2.3. Nivel de agua y de control de flujo

El nivel de agua y el control de flujo son generalmente las únicas variables operacionales que tienen un impacto significativo sobre un humedal. Los cambios en los niveles de agua afectan a la hidráulica tiempo de residencia, la difusión de oxígeno atmosférico en la fase de agua, y la cubierta vegetal..

Mantener el flujo uniforme en todo el humedal a través de entrada y salida de los ajustes es sumamente importante para lograr el rendimiento esperado del tratamiento. La entrada y salida de los colectores deben ser inspeccionadas regularmente y rutinariamente ajustadas y se debe comprobar la limpieza de desechos que pueden obstruir los orificios de entrada y salida. Será necesaria la eliminación de desechos y la eliminación de placas bacterianas de la tubería de distribución de aguas residuales y la tubería de recolección de agua tratada.

C.2.4 Mantenimiento de la vegetación

El mantenimiento rutinario de la vegetación de los humedales no es tan necesario, ya que esto puede ser de aislante térmico no afectando la temperatura del humedal. Se recomienda realizar la poda durante la época primavera-verano con el fin de que las grandes variaciones de temperatura no afecten las condiciones de operación y rendimiento del humedal.

C.2.5 Control de olor

Los olores emitidos por las zonas abiertas de agua son típicamente asociados con condiciones anaeróbicas, que pueden ser creadas por el exceso de DBO y la carga de

amoníaco. No obstante, la carga contaminante a tratar presente en las aguas lluvias no es alta, no debiese ser un problema.

C.2.6 Control de plagas de insectos

El control de mosquitos es una cuestión crítica en los humedales de flujo libre. Es decir, para este proyecto no se tendrá ese problema debido a que el humedal es de flujo subsuperficial y, por tanto, no presenta superficie libre.

C.2.7 Mantenimiento de la geomembrana.

La geomembrana puede verse seriamente afectados si durante el tiempo de funcionamiento de los humedales se plantan árboles alrededor de éstos, ya que es posible que las raíces penetren la geomembrana o alteren la disposición de los refuerzos de madera.

C.2.8 Medio granular

En principio estos sistemas se dimensionan para que la colmatación lo haga hacia el final de la vida útil de la instalación., sin embargo cuando la colmatación del medio granular es muy severa se debe proceder a la sustitución del medio, puesto que reducir notablemente los espacios intersticiales y deteriorando el real funcionamiento del medio granular. No obstante, este problema no debiera presentarse ya que el humedal trabajará con una carga contaminante baja, siendo ésta la causa principal de la colmatación producida.

ANEXO D: ZONA EN ESTUDIO

D.1 Fauna

Las lagunas son sistemas que están dotados de una vegetación muy particular, tanto terrestre como acuática, que sustenta a diversas especies y animales, sirviendo de refugio, alimento y otras actividades a diversas aves, anfibios, insectos y otros grupos de vertebrados e invertebrados que en su rol de productores y/o consumidores forman parte del funcionamiento del cuerpo acuático; todo lo cual es sustentado por el ciclo hidrológico. No obstante, este ecosistema en la actualidad se ve amenazado por la agresiva contaminación e invasión de sus espacios. La laguna lo Méndez no está exenta de aquello ya que la calidad del agua que presenta, hace que se dificulte la proliferación de estas especies, esto queda de manifiesto con el suceso ocurrido el pasado enero de 2011, donde se produjo la masiva muerte de peces (Diario El Sur, 2011). La causa de esta mortandad se le atribuye a la gran concentración de materia orgánica que tiene la laguna, producto de las descargas clandestinas de aguas servidas.

D.2 Flora

En terreno se pudo apreciar que en la riberas de la laguna abunda una densa vegetación, tales como plantas acuáticas de tipo “*typha angustifolia*, *maticaria chamomilla*, *spirogyra*, *hydrocotyle ranunculoides*, *conium maculatum*, *cyperus eragrostis*” (Figura D-1), principalmente donde descarga el afluente proveniente de la laguna lo Mendez. De las distintas plantas acuáticas que se pudieron identificar, se destaca la *Hydrocotyle ranunculoides* por ser un bioindicador de altos niveles de materia orgánica presente en la laguna.

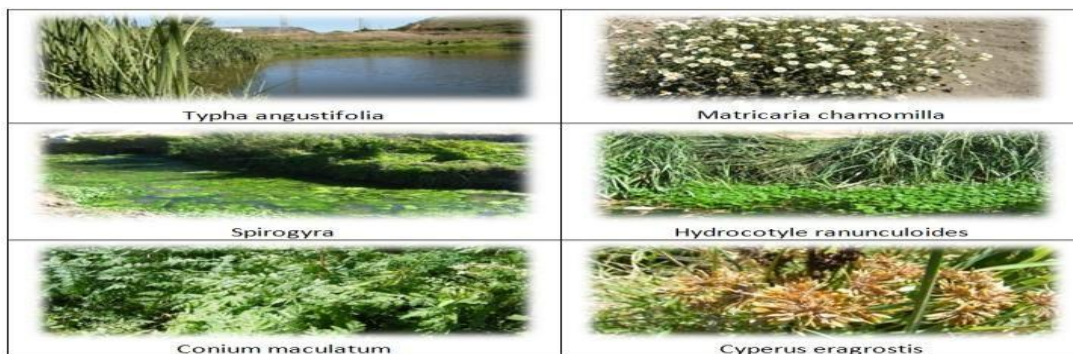


Figura D-1: Imágenes de la fauna identificada.

D.3 ·Contaminación por desechos sólidos y escombros

Se pudo apreciar que en las riberas y en el interior de la laguna existe una gran cantidad de basura, tales como cajas, vidrios y papeles, además, también se pudo identificar en el sector aledaño a las viviendas que las riberas son un lugar de acopio para desechos domiciliarios, como lavadoras, colchones y sillones. Sin embargo, este tipo de contaminación no es influyente desde el punto de vista de la eutrofización, no obstante, genera un impacto visual de deterioro y la mala condición de la calidad de vida de los sectores aledaños.



Figura D-2: Residuos en las riberas de la laguna

D.4 Descargas de Aguas lluvias en la Laguna

ANEXO E: RESULTADOS Y TABLAS

E.1 Hidrología

Considerando el humedal como un sistema abierto, se establecen las entradas y salidas de la siguiente manera:

- Entradas: Precipitaciones (Qp), Afluente (Qa)
- Salidas: Efluente (Qe), Evapotranspiración (ETP), Infiltración (I).

Los parámetros que intervienen significativamente a la hora de realizar este balance son la pluviosidad y la evapotranspiración, por lo tanto el almacenamiento en el humedal artificial está dado por:

$$\text{Almacenamiento en el Humedal} = (Qa+Qp)-(Qe+ETP)$$

E.1.1 Caudal medio anual

Se determinó el análisis hidrológico de la cuenca que permite determinar el Caudal medio anual de ingreso a la laguna. La determinación del caudal se hizo a través del Método Racional, de manera que se consideraron las precipitaciones en la última década en la zona (2001-2011), datos proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile. Se determina que la media anual es de 1081 mm (ver más detalle en Anexo E), lo cual significa que en este caso la intensidad media anual para el sector de la Laguna Lo Méndez es de 0,123 mm/hr., además se estima que el área que tributa hacia la red de colectores que descargan en la laguna equivalen a 0,39 Km²

De acuerdo a los datos antes señalados se establece que el caudal medio anual queda expresado:

$$Q_{med} = \frac{c \cdot i \cdot A}{3.6}$$

Ec. (E.1)

Siendo;

Qmed = Caudal del medio.

c = coeficiente de escorrentía

i = intensidad de la precipitación (mm/h)

A = Área que tributa hacia la red de colectores (m²)

$$Q_{med} = \frac{0,55 \cdot 0,123 \cdot 0,12}{3,6} = 0,00225 \frac{m^3}{s} = 195 \frac{m^3}{día}$$

E.1.2 Precipitación Media

Se determina la intensidad de la precipitación media anual, con el fin de ver la incidencia del caudal que ingresará al humedal por esta vía con la expresión:

$$Qp = i * A \quad \text{Ec. (E. 2)}$$

Donde;

Qp: Caudal de precipitación

i: Intensidad media de la

precipitación m/día A: Área del

Humedal subsuperficial (m²).

$$d) Qp = \frac{0,123 * 24}{1000} * 1600 = 4,72 m^3/día$$

E.1.3 Evapotranspiración (ETP)

En efecto, la evapotranspiración media mensual corresponde a 23,8 mm lo que equivale a una intensidad de 0,033 mm/h. El área disponible para instalar el humedal equivale a 1600 m², por lo tanto la pérdida de caudal queda dada por la ecuación:

$$ETP = i * A \quad \text{Ec. (E. 3)}$$

Donde:

ETP=Pérdida por Evapotranspiración

(m³/día), i=intensidad de la

evapotranspiración (mm/h), A=Área.

$$ETP = \frac{0,024 * 24}{1000} * 1600 = 0,92 m^3/día$$

E.2 Determinación de la Temperatura del Agua en el Humedal Aspectos térmicos

El humedal de flujo subsuperficial está diseñado con una profundidad de 0,6 m completamente de grava saturada, seguidamente se encuentra una capa de 0,1 m. de grava seca y finalmente se considera una capa de restos de vegetación de 0,15 m. Con estos datos, la conductividad térmica extraída de la Tabla A-5 y la ecuación (15A) se

obtendrá el coeficiente de transferencia de calor.

$$U = \frac{1}{\frac{0,6}{0,2} + \frac{0,1}{0,15} + \frac{0,15}{0,05}} = 0,3 \text{ W/m}^2$$

Se procede a calcular la media de temperatura del aire determinando las temperaturas más frías en los últimos 10 años proporcionadas por la Dirección meteorológica de Chile para la estación (Meteorológica, 2000-2010) de Concepción Carriel Sur (ver Anexo E). Los días considerados tienen que ver directamente con el tiempo de permanencia del agua en el humedal, para luego promediar las temperaturas de dichos días. Como el tiempo de residencia hidráulica en el humedal de 1,2 horas, por lo tanto sólo se considera el día de la temperatura más baja equivalente a $-2,9^{\circ}\text{C}$.

La energía entonces ganada por el flujo del agua a través del humedal se aplica mediante la ecuación (13A):

$$q_l = (12 - (-2,9)) * 0,3 * 86.400 * 2.268 * 0,84196 = 196.269.379,1 \text{ J}$$

La energía perdida por el flujo está dada por la ecuación (14A):

$$q_g = 4.215 * 1.000 * 2.268 * 0,4 = 1.146.702.748 \text{ J/}^{\circ}\text{C}$$

De la ecuación (16A) se obtiene el cambio de temperatura en el humedal (T_c), referida a las pérdidas y ganancias de calor.

$$T_c = \frac{196.269.379,1}{1.146.702.748} = 0,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

La temperatura del efluente (T_e) y la temperatura promedio del agua (T_w) de los dos humedales de flujo subsuperficial se obtienen mediante las ecuaciones (17A) y (18A).

$$T_e = 12 - 0,17 = 11,83 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_w = \frac{12 + 0,17}{2} = 11,91 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Por lo tanto se comprueba que está bien la temperatura asumida equivalente a 12°C es la correcta.

E.3 Tablas de Resultados Temperatura media y Precipitación Media.

Tabla E-1: Temperaturas mínimas de la última década en la zona

Extrema mínima últimos 10 años			
Fecha	Temperaturas (°C)	Fecha	Temperaturas (°C)
03/09/2000	-0,4	15/04/2006	-0,8
19/06/2001	-0,8	25/06/2007	-1,9
16/08/2001	-0,8	09/07/2007	-2,9
03/09/2001	-1,1	09/08/2007	-2,5
30/06/2002	-2,2	28/04/2008	-0,8
03/07/2002	-2,4	13/07/2010	-1,4
18/04/2003	-0,7	23/07/2009	-2,1
23/09/2003	-2	02/08/2010	-1,1

Tabla E-2: Temperaturas mensuales de la última década en la zona

	Temperaturas mensuales (2001-2011)											Temperatura media
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Enero	16,1	15,8	16	17,1	16,7	16,2	16,4	16,2	17	16,5	16,3	16,4
Febrero	16,1	15,7	14,9	15,6	15,8	16,7	16,8	15,5	17,1	16	15,2	15,9
Marzo	13,5	13,7	13,9	15	15,1	15	13,8	14,9	15	15	15,4	14,6
Abril	11,9	10,8	11,1	11,7	13,1	11,4	11,6	11,8	11,6	13,5	11,5	11,8
Mayo	10,9	10,5	10	9,8	10	10,1	10,2	9,4	10,1	11	9,3	10,1
Junio	10,7	9,2	7,4	11,3	9,7	9,6	11,1	7,5	9,3	8,8	9,9	9,5
Julio	10,7	9	8,2	7,9	9,6	9,4	9,7	7,6	10	8,2	8,1	8,9
Agosto	8	9,2	9,5	9,2	9,4	9,6	10,3	6,5	8,9	10,1	9	9,1
Septiembre	10	9,4	10,1	10,1	10,2	9,9	10,1	9,1	10,6	9,3	9,4	9,8
Octubre	12,2	12	11,7	12,1	11,7	11,5	11,6	11,5	11,9	11,5	11,7	11,8
Noviembre	13,5	13,2	13,4	14,5	13,7	14,2	13,5	13,1	14,7	12	13,4	13,6
Diciembre	15,7	15,9	15,3	14,9	16	15,3	15,3	14,8	16,6	15	14,5	15,4
Media	12,4	12,0	11,8	12,4	12,6	12,4	12,5	11,5	12,7	12,2	12,0	12,2

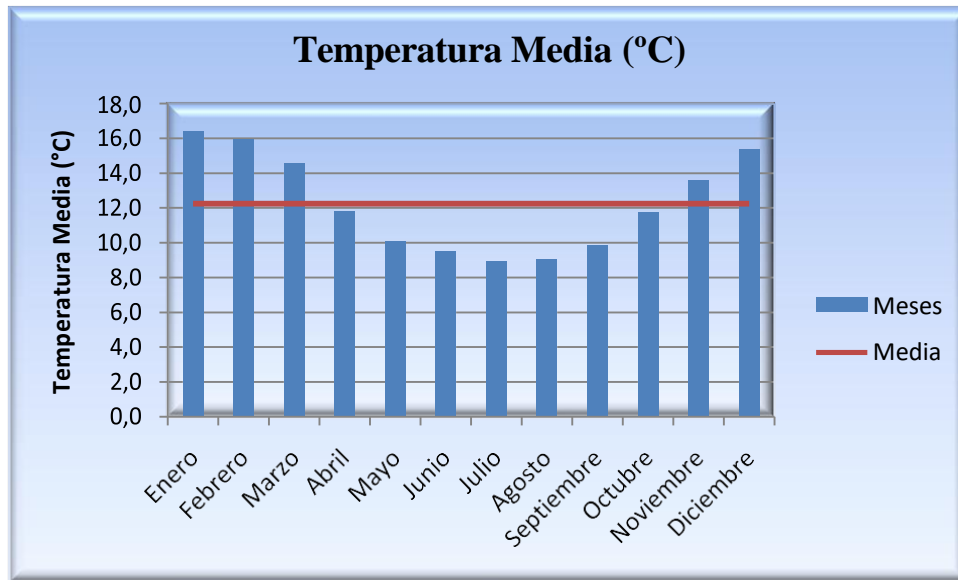


Figura E-1.: Temperatura Media en

la zona en estudio. Tabla E-2:

	Precipitación mensual											precipitación media
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Enero	2	58,2	1,2	9	0,1	1	29,4	24,4	3,6	8,4	18,8	14,2
Febrero	94,9	7,2	66,8	0	13,8	0,4	1,8	36,6	2,4	10,9	27,4	23,8
Marzo	6,1	44,3	90,7	9,2	49,2	22,8	10,2	9	3,8	6,8	5,8	23,4
Abril	46,2	40	84,6	18,6	127	9,4	120,8	132,8	53,2	14,2	7,2	59,5
Mayo	58,8	293,7	180,9	73,1	64	357,5	107,4	73	323	133,2	37,2	154,7
Junio	565,7	235,8	114,4	309,5	255	431,9	309,6	89,2	95,6	280,3	186	261,2
Julio	81,1	375,5	158,2	109,8	205,9	165,8	312,3	175,9	290,4	118,2	248,2	203,8
Agosto	218,5	195,4	300,7	64,4	145,6	177,7	235,8	118,8	237,8	215,4	133,2	185,8
Septiembre	257,5	49,6	116,5	129,6	73,6	74,4	41,3	58,4	80	51,4	21,2	86,7
Octubre	33	24,4	182,3	60,8	126,4	28,6	90	31,7	30,2	52	43,4	63,9
Noviembre	27,4	34,5	51,5	76,7	47,1	48,6	3	4	11,6	43,8	17,2	33,2
Diciembre	15,2	0	15,4	11	19,2	64,8	53,9	25,6	5,4	0,6	14,6	20,5
Anual	1406,4	1358,6	1363,2	871,7	1126,9	1382,9	1315,5	779,4	1137,0	935,2	760,2	1130,6

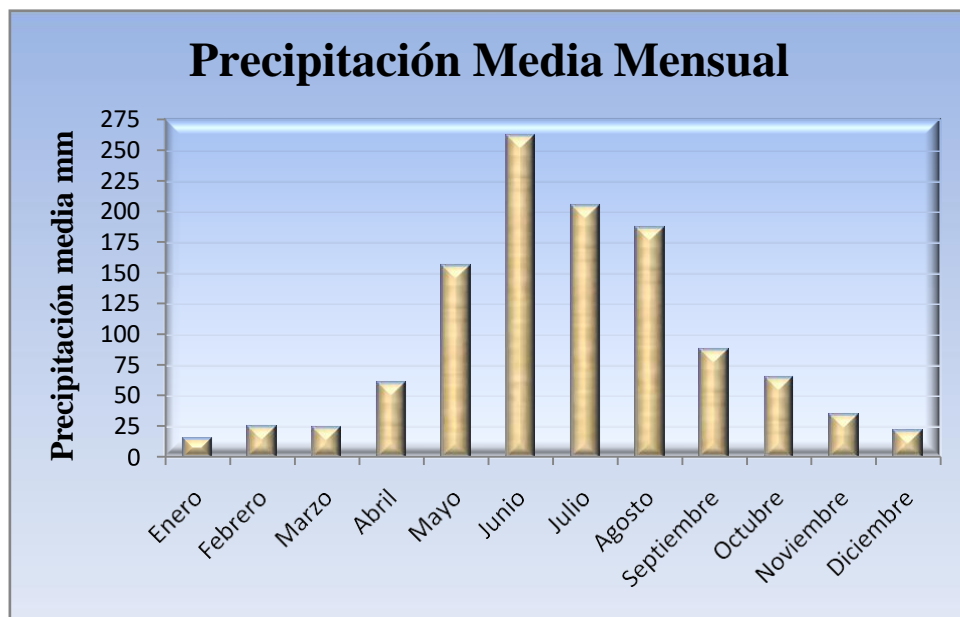


Figura E-3: Precipitaciones Medias Mensual

Tabla E-3: Factor “f” de corrección por latitud. Latitud sur, Método de Thornwaite

°C	ENE	FEB.	MA R.	ABR	MA Y.	JUN.	JUL.	AGO	SEP.	OCT	NOV	DIC
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
1	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
2	1.05	0.94	1.04	1.01	1.03	1.00	1.04	1.04	1.01	1.04	1.02	1.05
3	1.05	0.95	1.04	1.00	1.03	1.00	1.03	1.04	1.00	1.04	1.02	1.05
4	1.06	0.95	1.04	1.00	1.03	0.99	1.03	1.03	1.00	1.05	1.02	1.06
5	1.06	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
6	1.06	0.96	1.04	1.00	1.02	0.98	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.07
7	1.07	0.96	1.04	1.00	1.02	0.98	1.01	1.02	1.00	1.05	1.03	1.08
8	1.07	0.96	1.05	0.99	1.01	0.97	1.01	1.02	1.00	1.06	1.04	1.08
9	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.97	1.00	1.02	1.00	1.06	1.04	1.09
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
11	1.09	0.97	1.05	0.99	1.00	0.96	0.99	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
12	1.09	0.97	1.05	0.99	1.00	0.95	0.99	1.01	1.00	1.06	1.06	1.11
13	1.10	0.98	1.05	0.98	0.99	0.95	0.98	1.00	1.00	1.07	1.06	1.11
14	1.11	0.98	1.05	0.98	0.99	0.94	0.98	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
16	1.12	0.99	1.05	0.98	0.98	0.93	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.13
17	1.13	0.99	1.05	0.98	0.97	0.93	0.96	0.99	1.00	1.07	1.08	1.13
18	1.13	0.99	1.05	0.97	0.97	0.92	0.95	0.99	1.00	1.08	1.08	1.14
19	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.92	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.14
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
21	1.15	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.94	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
22	1.15	1.00	1.05	0.97	0.95	0.90	0.94	0.98	1.00	1.09	1.00	1.16
23	1.16	1.01	1.05	0.96	0.95	0.89	0.93	0.98	1.00	1.09	1.00	1.17
24	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.89	0.93	0.98	1.00	1.09	1.11	1.17
25	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
26	1.18	1.02	1.05	0.96	0.94	0.88	0.92	0.97	1.00	1.10	1.12	1.18
27	1.18	1.02	1.05	0.96	0.93	0.87	0.92	0.97	1.00	1.11	1.121	1.19
28	1.19	1.02	1.06	0.95	0.93	0.86	0.91	0.97	1.00	1.11	1.13	1.20
29	1.19	1.03	1.06	0.95	0.92	0.86	0.91	0.96	1.00	1.11	1.13	1.20
30	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
31	1.21	1.03	1.06	0.95	0.91	0.84	0.90	0.96	1.00	1.12	1.15	1.22
32	1.21	1.03	1.06	0.95	0.91	0.84	0.89	0.95	1.00	1.12	1.15	1.23
33	1.22	1.04	1.06	0.94	0.90	0.83	0.88	0.95	1.00	1.13	1.16	1.23
34	1.22	1.04	1.06	0.94	0.90	0.83	0.87	0.95	1.00	1.13	1.16	1.24
35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
36	1.24	1.05	1.06	0.94	0.89	0.81	0.86	0.94	1.00	1.14	1.18	1.26
37	1.25	1.05	1.06	0.94	0.88	0.80	0.85	0.93	1.00	1.14	1.19	1.27
38	1.25	1.05	1.07	0.93	0.87	0.80	0.85	0.93	1.00	1.14	1.19	1.27
39	1.26	1.06	1.07	0.93	0.87	0.79	0.84	0.93	1.00	1.15	1.20	1.28

ANEXO F: PRESUPUESTO ESTIMATIVO