

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIRÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Dr.Ing. Pedro Cisterna Osorio.



**MANEJO DE AGUAS LLUVIAS
INGRESANTES A HUMEDAL ARTIFICIAL
TOMEKO CON ANCLAJE INNOVADOR
DEL MATERIAL IMPERMEABILIZANTE.**

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

Ingeniero Civil

SAMIRA AURELIA YAÑEZ GUTIERREZ

Concepción, Marzo 2019

INDICE GENERAL

Índice de Figuras.....	iv	
Índice de Tablas.....	vi	
RESUMEN	1	
ABSTRACT.....	2	
1.- Introducción.....	3	
1.1.- Justificación.....	4	
1.2.- Objetivos.....	4	
1.2.1.-.....		Objetivo General 4
1.2.2.-.....		Objetivos Específicos 4
2.- Marco Teórico.....	5	
2.1.- Humedales Artificiales.....	5	
2.1.1.- Humedales Artificiales de flujo superficial o libre.....	6	
2.1.2.- Humedales Artificiales de flujo sub-superficial.....	6	
2.2.- Componentes de los Humedales Artificiales de flujo sub-superficial.....	7	
2.2.1.- Agua Residual.....	7	
2.2.2.- Microorganismos y sustratos.....	7	
2.2.3.- Vegetación y Paisaje.....	7	
2.2.4.-Material Aislante de alta densidad (Impermeabilizante de HDPE).....	8	
2.2.4.1.-Colocación del material impermeabilizante.....	9	
2.2.4.2.-Fijación de los bordes del material (manera convencional).....	9	
2.2.5.-Estructuras de entrada y salida de efluente.....	11	
3.- Metodología.....	12	
3.1.- Situación previa, definición de la problemática a estudiar.....	12	
3.2.-Determinación de flujo proveniente de escorrentía.....	13	
3.3.-Caracterización del suelo.....	13	
3.3.1.-Ensayos de granulometría.....	14	
3.3.2.-Ensayo Potcher de infiltración del suelo.....	19	
3.4.-Manejo de las aguas lluvias.....	20	
3.4.1.-Tubos para la conducción de las aguas.....	20	
3.4.2.-Preparación del terreno.....	21	

3.4.3.-Descarga de caudal controlado de agua en la zona de interfase entre suelo y el material impermeabilizante.	21
3.5.-Parámetros del sistema de manejo de aguas.....	22
3.5.1-Medición del nivel de acumulación de agua.....	22
3.5.2.-Aforo del agua que sale por el dren e ingresa al humedal.....	22
3.6.-Arrastre de material hacia la tubería provocado por la escorrentía y fijación del material HDPE.....	22
4.- Desarrollo y Resultado.....	23
4.1.-Estudio hidrológico del lugar.....	23
4.1.1.-Precipitaciones máximas.....	23
4.1.2.-Determinación del área aportante.....	24
4.1.3.-Cantidad máxima de agua que podría llegar al talud.....	25
4.2.-Estudio y caracterización del tipo de suelo existente en el talud.....	26
4.2.1.-Granulometría.....	27
4.2.2.-Ensayo potcher.....	33
4.3.-Instalación del drenaje para la evacuación de la escorrentía hacia el humedal.....	34
4.3.1.-Descarga de caudal controlado de agua.....	36
4.4.-Estudio de parámetros del sistema de drenaje.....	36
4.4.1.-Medición del nivel de acumulación de agua en el lugar de drenaje.....	37
4.4.2.-Aforo de agua que sale por el dren e ingresa al humedal.....	39
4.5.- Prueba de arrastre de material y fijación del borde del material impermeabilizante.....	41
4.5.1.-Arrastre de material hacia la tubería de drenaje.....	41
4.5.2.-Fijación del borde del material impermeabilizante.....	44
Conclusiones.....	47
Referencias.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquema colocación material impermeabilizante, manera convencional.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2. Fijación convencional de los bordes del material impermeabilizante.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3. Zona de anclaje innovador.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Cuadro de ubicación humedal artificial sub-superficial Tomeco.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5. Constatación de acumulación de agua.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6. Estados de consistencia.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 7. Maquina casa grande.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 8. Forma de acanalado.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 9. Conformación de cilindros.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 10. Primera etapa ensayo de infiltración.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 11. Segunda etapa ensayo de infiltración.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 12. Tercera etapa ensayo de infiltración.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 13. Esquema para perforaciones de tubos.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 14. Montaje del sistema de drenaje.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 15. Ubicación de Estación Meteorológica utilizada para el análisis.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 16. Zanja y canal de drenaje.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 17. Identificación del área aportante.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 18. Excavación proyectada y real para la construcción del humedal sub-superficial....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 19. Realización de la excavación.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 20. Orden De tamices para realizar granulometría.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 21. Equipo Casa Grande.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 22. Determinación de límite líquido utilizando maquina Casa Grande.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 23. Grafico Cuerva de fluidez.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 24. Referencia de ubicación de los distintos tipos de suelo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 25. Perfilado del talud para definición de pendiente.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 26. Angulo definido del talud.....</i>	<i>32</i>

<i>Figura 27. Ensayo Potcher N°1 suelo SM.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 28. Ensayo Potcher N°2 suelo SM-SC.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 29. Preparación de perforaciones en tubos del dren.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 30. Pendientes adaptadas para el sistema de drenaje.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 31. Instalación del sistema de drenaje.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 32. Salida del drenaje hacia el humedal utilizando una unión T.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 33. Simulación de lluvia artificial sobre el talud.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 34. Medición del nivel de agua acumulado.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 35. Flujo de agua que drena bajo la tubería.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 36. Flujo ingresante en el sistema de drenaje.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 37. Área 1 y 2 utilizadas para el ensayo.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 38. Determinación arrastre de material sin capa vegetal.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 39. Determinación arrastre de material implementando vegetación.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 40. Recipientes con muestra posterior al ensayo.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 41. Muestras secas y pesadas.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 42. Planta Doca, Frutilla del mar.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 43. Fijación de material en zona sin sistema de drenaje.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 44. Fijación de material en zona con sistema de drenaje.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 45. Imagen de comparación del humedal antes/después.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 46. Registro del humedal fecha: 25/03/2019.....</i>	<i>46</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Propiedades del HDPE liso.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2. Numeración y abertura de tamices.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 3. Rango de ángulos de inclinación según clasificación del suelo.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 4. Precipitaciones diarias (mm) Periodo: 01/01/2018 - 31/12/2018.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 5. Granulometría Muestra N°1.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6. Granulometría Muestra N°2.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 7. Ficha determinación límite líquido y plástico.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 8. Angulo de inclinación.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 9. Datos obtenidos ensayo Potcher.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 10. Lluvias artificiales de simulación.....</i>	<i>37</i>

Título: Manejo de aguas lluvias ingresantes a humedal artificial Tomeco con anclaje innovador del material impermeabilizante.

Autor: Samira Aurelia Yañez Gutiérrez

Departamento de ingeniería civil y ambiental, Universidad del Bío Bío.

Correo Electrónico: sayanez@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Doctor Pedro Cisterna Osorio

Departamento de ingeniería civil y ambiental, Universidad del Bío Bío.

Correo Electrónico: pcisterna@ubiobio.cl

Resumen

La construcción de un humedal artificial sub-superficial muchas veces se ve enfrentado a problemas relacionados con su lugar de emplazamiento, un ejemplo de esto es el Humedal Tomeco construido en el año 2018 en la comuna de Yumbel.

En este caso la presencia de un talud cuya altura y ubicación no permitió una fijación convencional del material impermeabilizante. Sumado a esto las características de la superficie adyacentes al lugar permiten el desplazamiento de escorrentías provenientes de las lluvias en la zona, hacia la cavidad localizada entre el talud y el borde de la membrana generando una acumulación de agua perjudicial para la vegetación del humedal.

Mediante la implementación de un sistema de drenaje ubicado entre la membrana y el talud se busca dar solución a la problemática existente conduciendo la escorrentía hacia el interior del humedal, posteriormente se realizó una fijación de los bordes de la membrana lo que permite dar protección al drenaje, quedando este totalmente cubierto mejorando la estética del humedal y solucionando satisfactoriamente el problema inicial.

La implementación del sistema permite dar el pie inicial en la construcción de humedales con una fijación de membrana de manera innovadora, disminuyendo los m² de material HDPE a utilizar, así como también disminuye el trabajo realizado para la fijación y el área disponible para la construcción del humedal.

Todo esto debe ser previamente evaluado en base al tipo de suelo existente y la geografía del lugar donde se llevara a cabo la construcción.

Title: Management of incoming rainwater to Tomeco artificial wetland with innovative anchoring of waterproofing material.

Author: Samira Aurelia Yañez Gutiérrez

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio Bio.

Email: sayanez@alumnos.ubiobio.cl

Professor Sponsor: Dr. Pedro Osorio Cisterna

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio Bio.

Email: pcisterna@ubiobio.cl

Abstract

The construction of a subsurface artificial wetland is often faced with problems related to its location, an example of this is the Tomeco Wetland built in 2018 in the Yumbel commune.

In this case the presence of a slope whose height and location did not allow a conventional fixation of the waterproofing material. Added to this, the characteristics of the surface adjacent to the site allow the displacement of runoff from the rains in the area, towards the cavity located between the slope and the edge of the membrane, generating an accumulation of water that is detrimental to the vegetation of the wetland.

By means of the implementation of a drainage system located between the membrane and the slope, it is sought to solve the existing problem leading the runoff into the interior of the wetland, later a fixation of the edges of the membrane was made which allows to protect the drainage, being completely covered by improving the aesthetics of the wetland and satisfactorily solving the initial problem.

The implementation of the system allows to give the initial foot in the construction of wetlands with a membrane fixation in an innovative way, decreasing the m² of HDPE material to be used, as well as decreasing the work done for the fixation and the area available for the construction of the wetland.

All this must be previously evaluated based on the type of existing soil and the geography of the place where the construction will take place.

1. Introducción

En Chile 2.300.000 habitantes son parte de la población en zonas rurales, donde un 63% (1.459.000) de pobladores presentan demanda por saneamiento de aguas residuales según datos obtenidos por el SISS en el año 2016.

Los Humedales son generalmente implementados en zonas rurales o con baja cantidad de población ya que se necesita de un área importante para su construcción determinada por una cierta dotación.

Si bien un humedal nos permite depurar las aguas residuales mediante el uso de plantas, también son capaces de dar continuidad a la vegetación del lugar sobre un sistema de tratamiento sub-superficial, donde se imponen de manera benefactora a las necesidades de la comunidad disminuyendo costos de construcción y mantención siendo una alternativa totalmente viable si consideramos que la mayoría de los pobladores de lugares rurales son personas con un bajo ingreso.

Las etapas comunes para la construcción de un Humedal con flujo sub-superficial se basan en:

- Definición y Delimitación del espacio donde se llevara a cabo la construcción.
- Excavación del área delimitada.
- Recubrimiento del área del humedal a través de la colocación del material Impermeabilizante de alta densidad (HDPE).
- Colocación de capa de arena.
- Instalación de artefactos de entrada y salida de agua.
- Colocación de plantas y grava.

Una de las etapas primordiales en la construcción de un Humedal artificial es el recubrimiento del área a utilizar mediante el uso del material impermeabilizante, el cual contiene las aguas a tratar e impide el traspaso de agentes contaminantes provenientes de las aguas residuales domiciliarias hacia la superficie de terreno y posteriormente a la napa de agua existente.

Dicho material comúnmente se debe fijar sobre la superficie adyacente al humedal, para lo cual necesitamos un área disponible aun mayor a la que realmente será utilizada con un propósito.

Una nueva forma de fijar el impermeabilizante de HDPE nos generaría una disminución de área a ocupar y una menor cantidad de m^2 a utilizar de HDPE disminuyendo costos considerablemente, sin embargo es necesario realizar ciertos estudios para tener presente las problemáticas adversas que puede generar este tipo de fijación no convencional que pueden desatar situaciones perjudiciales para el funcionamiento del humedal.

En este contexto, se enmarca la presente memoria de título, la cual, busca continuar con el proceso de innovación desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Bío-Bío, entregando una base para dar solución a problemas presentes en la

construcción de Humedales Artificiales con fijación innovadora del material impermeabilizante para el tratamiento biológico de aguas residuales.

1.1 Justificación.

En las zonas Rurales un 63% de la población presenta un déficit en lo que respecta a tratamiento de las aguas residuales producidas por las actividades propias de la vida cotidiana en los hogares de quienes residen estos lugares, siendo una solución muy común la utilización de fosa séptica solo como tratamiento primario sin tener plena conciencia de la calidad de efluentes entregados para ser reintegrados al medio natural, las aguas pueden ser tratadas mediante sistemas de Lodos Activos caracterizados por su costo elevado y su complejidad, siendo un humedal sub-superficial una buena alternativa de tratamiento de aguas residuales.

Teniendo una sujeción innovadora del material impermeabilizante debido a condiciones de terreno distintas, lo que genera una acumulación de agua entre la pared (talud) y el material HDPE, es necesario conducir dicha escorrentía que llega al lugar de manera que no perjudique el sistema de impermeabilización del humedal ni su funcionamiento, adecuándose a las condiciones de terreno existente.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo general:

Proponer solución para el manejo de la escorrentía que desemboca en humedal artificial de flujo sub-superficial Tomeco con sujeción innovadora del material impermeabilizante.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Describir el proceso constructivo del manejo de las aguas lluvias y la forma de sujeción de los bordes del material impermeabilizante.
- Caracterizar y describir, la acumulación de agua y arrastre de material producido por la escorrentía tributaria sobre la pared (talud), generada por la sujeción no convencional de la membrana impermeable.
- Evaluar parámetros del sistema de conducción y disposición de agua implementado.

2. Marco teórico

Hoy en día la construcción de humedales como fuente de tratamiento de aguas residuales está tomando un lugar importante dentro de las zonas rurales, según datos del Ministerio del Interior y Orden Público, en su estudio “Déficit de saneamiento sanitario nacional, año 2011”, sólo en la Región del Biobío existen 46.300 familias de sectores rurales, semi-rurales y urbanas descentralizadas, sin red de alcantarillado y por ende sin tratamiento de aguas residuales. A esto se debe sumar la existencia de alrededor de 1.800 campings, los cuales, en gran medida aun limitan el tratamiento de sus aguas al uso de la fosa séptica vertiendo las aguas provenientes de estas directamente al suelo o a cuerpos de aguas superficiales. (INE, 2010)

Dada la LEY NÚM. 20.998, la cual, regula los SERVICIOS SANITARIOS RURALES. Una de las etapas de servicios sanitarios rurales comprende el tratamiento y disposición final de las aguas servidas la cual consiste en la remoción de los contaminantes presentes para la posterior evacuación de éstas en cuerpos receptores, y en el manejo de los lodos generados, en las condiciones que establece la normativa legal y reglamentaria vigente, o en sistemas de tratamiento.

La SISS – Superintendencia de Servicios Sanitarios- clasifica los tipos de tratamientos de aguas, como **convencionales, no convencionales y emisarios submarinos**, siendo los humedales clasificados como no convencionales dado que no involucran mecanización para su funcionamiento, pero requieren grandes extensiones de terreno.

Los humedales artificiales se pueden considerar como sistemas de tratamiento natural por lo cual presenta velocidades de depuración bajas a base del crecimiento natural de los microorganismos y la vegetación, lo que genera un mayor tiempo de residencia hidráulica y un área disponible mayor para lograr niveles de eficiencia similares a los sistemas convencionales.

Una de las ventajas de este sistema de tratamiento es su bajo costo en mantención y operación, teniendo un análisis costo-beneficio favorable.

2.1. Humedales Artificiales

Los humedales artificiales son sistemas de Fito depuración de aguas residuales a través de un cultivo de plantas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las plantas genera interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada a medida que avanza su recorrido por el humedal, tratando la demanda bioquímica (DBO), los sólidos suspendidos (SS), nitrógeno (N), metales, trazas orgánicas y agentes patógenos.

Estos contaminantes son eliminados mediante sedimentación, degradación microbiana, absorción, reacciones químicas y acción de la vegetación dispuesta en el lecho, basando su funcionamiento en la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de la vegetación día a día, y el aporte del lecho formado con material granular que sirve como material filtrante.

La construcción de un humedal se lleva a cabo a partir de una excavación de profundidad inferior a 1 [m], la cual se debe impermeabilizar utilizando una membrana aislante (HDPE $e=1.5$ [mm]) para impedir la infiltración de contaminados provenientes del afluente al subsuelo, sobre esta membrana se debe colocar una capa de arena en el fondo que es cubierta por grava que servirá como base para el enraizamiento y fortalecimiento de las plantas.

Dentro de la clasificación de humedales de acuerdo al flujo del afluente se pueden encontrar dos tipos:

2.1.1. Humedales artificiales de flujo superficial o libre

Sistemas en que el flujo de agua está en contacto directo con la atmosfera, los humedales de flujo libre es una modificación de las lagunas convencionales, pero con menor profundidad ($<0,6$ [m]) lo que permiten generar un hábitat para una diversidad de fauna.

2.1.2. Humedales artificiales de flujo sub-superficial:

Este tipo de humedales se caracterizan por el escurrimiento de las aguas por debajo del nivel del medio granular subterráneo, con profundidad cercana a $0,6$ [m], dentro de este grupo se encuentran:

- *Humedales de flujo sub-superficial vertical*

Este sistema consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, recubierta por una membrana impermeable, con plantas acuáticas en su lecho, cuya agua fluye verticalmente desde la superficie del terreno hasta el fondo del lecho del humedal, con una distribución uniforme.

- *Humedales de flujo sub-superficial horizontal*

El humedal artificial en estudio en este trabajo corresponde a uno de flujo sub-superficial horizontal. El agua ingresa en forma permanente y es aplicada en la parte superior de un extremo y recolectada por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye a través de la longitud del humedal atravesando el medio poroso. La profundidad del lecho varía entre $0,45$ m a 1 m y tiene una pendiente de entre $0,5$ % a 1 %. El agua residual ingresa a una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño y luego al medio granular principal (cuerpo). El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada para la zona de amortiguación. La zona de plantación está constituida por grava de un solo diámetro y es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie, lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento.

2.2. Componentes de los humedales artificiales de flujo sub-superficial

2.2.1. Agua residual

Las aguas residuales son definidas como los Efluentes que resultan del uso del agua en las viviendas, el comercio o la industria como resultado de actividades urbanas, industriales o agrícolas. Contienen materia orgánica e inorgánica, organismos vivos, elementos tóxicos, entre otros, que las hacen inadecuadas para su uso, y es necesaria su evacuación, recolección y transporte para su tratamiento y disposición final caracterizadas por componentes físicos, biológicos y químicos, siendo principalmente formadas por componentes químicos, es decir sustancias transportadas por el agua provenientes de la materia orgánica, siendo esta biodegradable lo que permite que estas aguas puedan ser depuradas por medio de microorganismos, debido a que estos los utilizan para alimentarse y como fuente de energía para su metabolismo y reproducción.

2.2.2. Microorganismos y sustrato

La degradación de materia orgánica y eliminación de nutrientes en los humedales artificiales de flujo sub-superficial son regulados por microorganismos existentes (bacterias, levaduras, hongos y protozoarios) y su metabolismo celular. La actividad de los microorganismos puede ser aeróbica o anaeróbica, dentro de las cuales encontramos:

- Transformación de un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- Altera las condiciones de potencial redox del sustrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal.
- Está involucrada en el reciclaje de nutrientes.

El sustrato de un humedal está formado por: arena, grava, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. En este medio ocurre la retención y sedimentación de la materia transportada por el afluente, la degradación y transformación de la materia orgánica conjunta con la eliminación de microorganismos patógenos.

La composición del medio granular debe permitir el desarrollo progresivo de las plantas, teniendo en cuenta que con el paso del tiempo la conductividad hidráulica en el lecho se verá afectada.

2.2.3. Vegetación y paisaje

La vegetación en los humedales artificiales es fundamental debido a que estas a través de la fotosíntesis transfieren oxígeno desde la atmósfera a través de sus hojas y tallos a las raíces y rizomas enterrados, cuyo oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación. Algunas de las plantas emergentes utilizadas en humedales son las espadañas, carrizos, juncos y juncos de lagunas.

El paisaje que aportan los humedales artificiales en las zonas rurales es muy satisfactorio, ya que se relacionan directamente con el entorno, y tiene una mejor aceptabilidad por parte de los habitantes del lugar que conviven con este sistema. En ese sentido los humedales artificiales dada su vegetación abundante tienden a fundirse con el paisaje, muchas veces siendo imperceptible la función principal, es decir, el tratamiento de aguas residuales, otorgando cualidades que benefician al medio donde se emplazan.

2.2.4. Material Aislante de alta densidad (Impermeabilizante de HDPE)

La función del material aislante es confinar las aguas residuales que serán tratadas dentro del área o excavación donde se encuentra el sustrato y la vegetación para el posterior tratamiento, evitando la infiltración de agua contaminada hacia el subsuelo, lo que dañaría las napas subterráneas donde este emplazado el humedal. Es obligatorio que el material aislante cubra la base y las paredes de la excavación.

El impermeabilizante de HDPE presenta una permeabilidad entre 1×10^{-11} y 1×10^{-12} m/s lo que es una ventaja al ser comparada con otros métodos de impermeabilización como por ejemplo compactación de suelos arcillosos y geo-textiles, a esto se le agrega su alta durabilidad, una alta resistencia química, resistencia a la radiación ultravioleta y monetariamente es más económico.

El polietileno de alta densidad es un material termoplástico que no absorbe humedad y es inerte fisiológicamente, son fabricados con resina vírgenes de polietileno de alta densidad y un peso molecular igual a 0.94 gr/m³ en un 97,5% y entre a un 2% a 3% de carbón, antioxidantes y estabilizadores de calor lo que permite que posea una alta resistencia a la acción de los rayos ultravioletas de un coeficiente de expansión del 700%, siendo ideales para utilizarlas en lugares expuestos teniendo una larga duración, además de lo descrito posee las siguientes propiedades mecánicas:

PROPIEDADES	NORMA ASTM	UNIDADES DE MEDIDA	PRESENTACIONES			
			ESPESOR	ESPESOR	ESPESOR	ESPESOR
			0,50MM	0,75MM	1,0MM	1,5MM
Densidad	D792 /	gr/cc	0.94	0.94	0.940	0.94
Tensión Punto Fluencia	D6693	KN/m	7	11	15	22
Tensión Punto Ruptura	Tipo IV	KN/m	13	20	27	40
Elongación Punto Fluencia		%	12	12	12	12
Elongación Punto Ruptura	D882	%	800	800	800	800
Resistencia al Rasgado	D1004	N	50	93	125	187
Resistencia al Punzonado	D4833	N	200	240	320	480
Resistencia al Agrietamiento	D5397	hr			300	
Dispersión de Carbón	D5596	Categoría			1 o 2	
Dispersión de Carbón	D1603/D4218	%			2.0 - 3.0	
Tiempo de Inducción Oxidativa. 200°C	D3895	min	>110	>110	>110	>110
Espesor Nominal		mm	0.5(+ - 10%)	0.75(+ - 10%)	1(+ - 10%)	1.5(+ - 10%)

T

Tabla 1. Propiedades del HDPE liso. Fuente: Grupo Tigre (www.grupotigre.com).

2.2.4.1. Colocación del material impermeabilizante

El material impermeabilizante cubre la totalidad del lecho y taludes laterales involucrados, se coloca en capas dispuestas de manera que se traslapen entre sí, cuyas uniones se realizarán mediante termofusión del material, para ello la temperatura del paño no debe superar los 75°C la cual es medida con un termómetro infrarrojo o termocupla de superficie. La soldadura se lleva a cabo mediante equipos automáticos y técnicas de soldadura a fusión, minimizando arrugas excesivas en las uniones de soldaduras de manera de lograr un traslape plano con el fin de impedir cualquier tipo de infiltración hacia el subsuelo.

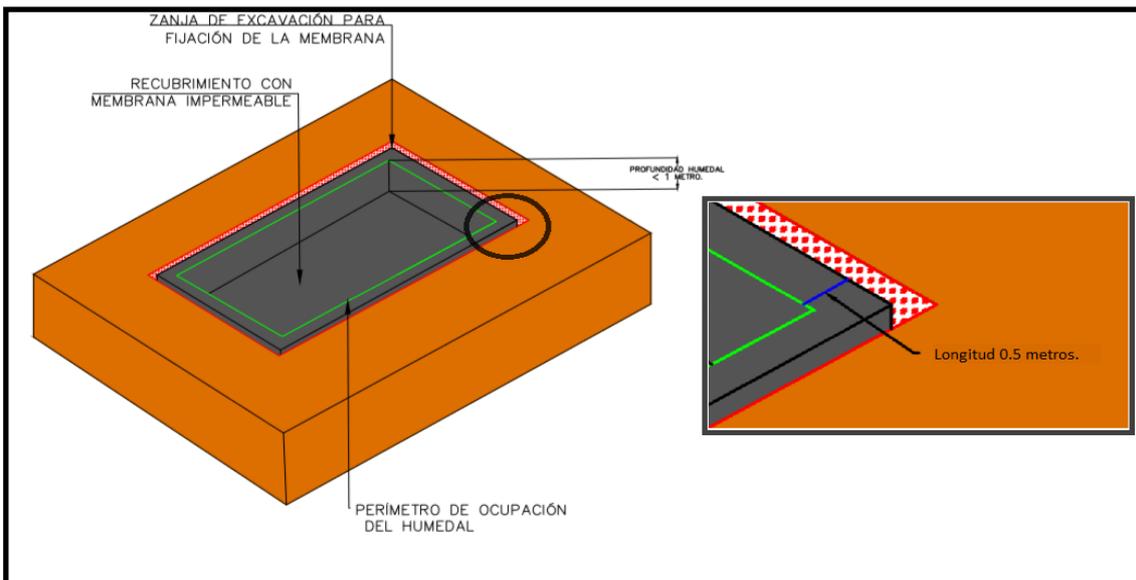


Figura 1. Esquema colocación material impermeabilizante, manera convencional. (Fuente propia)

2.2.4.2. Fijación de los bordes del material (manera convencional)

Los bodes de la membrana son fijados en la superficie adyacente a los taludes laterales del humedal, por lo cual es necesario disponer de una superficie libre igual a 0.5 metro de longitud que rodee todo el perímetro del humedal para poder realizar la fijación.

Se realiza una excavación a 0.5 metro de la cima del talud por todo el perímetro del humedal, la cual permite introducir los bordes de la membrana de tal forma que estos queden fijos entre la superficie terrestre. Este método de fijación aumenta el área necesaria para la construcción del humedal en una magnitud igual a:

$$(2*0.5*Largo + 2*0.5*Ancho)+ 1$$

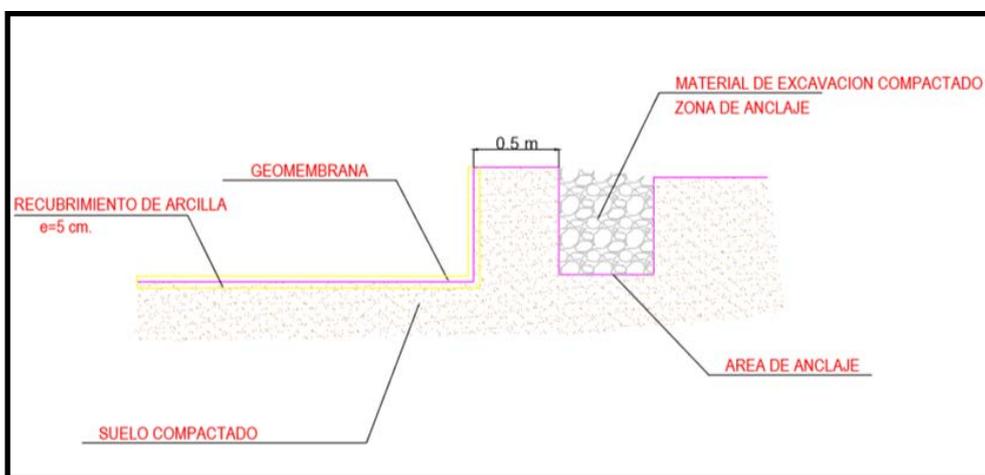


Figura 2. Fijación convencional de los bordes del material impermeabilizante. (Fuente propia)

Pero que sucede cuando las condiciones de terreno nos presentan situaciones de paredes laterales complicadas no aptas para la fijación convencional del material presentada anteriormente, en ese caso se deberá ejecutar una fijación no convencional que se adapte a las condiciones de terreno existentes con el fin de cumplir la finalidad del impermeabilizante de HDPE en la construcción de un humedal.





Figura 3. *Zona de anclaje innovador. (Fuente propia)*

Conjunto a esta situación es posible encontrarse con otro tipo de problemas como por ejemplo falta de espacio para el anclaje, y acumulación de agua entre la pared y el material impermeabilizante de HDPE.

La realización de un anclaje innovador se puede dar por varias razones:

1. Disponibilidad de espacio limitado por muros e infraestructura.
2. Presencia de desniveles en el terreno.
3. Presencia de taludes con altura significativa, por ejemplo construir en zona con presencia de cerros.

Por otra parte la acumulación de agua entre la pared y el impermeabilizante se pueden producir por la presencia de escorrentías que dirigen el flujo de agua hasta esta zona baja dada las pendientes del terreno adyacente al lugar esto sumado a la composición del suelo, es decir presencia de suelo con gran cantidad de finos (arcilla) que genera una zona impermeable que favorece la acumulación de agua.

Para este caso es necesario emplear un sistema que permita la conducción de las aguas acumuladas ya sea hacia un pozo de absorción en el exterior del humedal o dirigir las directamente hacia el interior del humedal por medio de una interface entre el borde del material impermeabilizante y el medio granular del humedal.

Para la conducción de las aguas hacia el exterior del humedal es necesario realizar una zanja o canal en la cima del talud comprometido de manera que las aguas de escorrentía sean recolectadas antes de la zona de conflicto, para luego ser conducidas al pozo de absorción.

Si las aguas quieren ser evacuadas hacia el interior del humedal es necesaria la instalación de un sistema drenaje encargado de recolectar y conducir el flujo de las aguas de escorrentías que lleguen al lugar hacia la zona de interface.

2.2.5. Estructuras de entrada y salida de efluente

Para lograr una alta eficiencia en la depuración de aguas se requieren de una buena repartición y recogida de las mismas, es por ello que el dispositivo de ingreso es ubicado en el

extremo donde se encuentra el punto más alto de la base del humedal, se coloca un tubo perforado perpendicular al eje longitudinal. Por otra parte, para recoger las aguas tratadas y expulsarlas del humedal es necesario colocar otro tubo perforado también perpendicular al eje longitudinal, pero en el punto más bajo del humedal. Por medio de un Sifón se logra controlar el nivel de agua y así se evita la fuga masiva de las aguas.

3. Metodología

3.1. Situación previa, definición de la problemática a estudiar.

Situación presente en un humedal artificial sub-superficial construido en la localidad de Tomeco, comuna de Yumbel perteneciente a la región del Bio-Bio, Chile.

Este humedal se llevó a cabo dada la necesidad de las familias, una zona rural del país que no presenta grandes ingresos, por lo cual la implementación de este sistema de tratamiento biológico disminuirá considerablemente un gasto en cada familia que reside en esta localidad y a su vez le brindará un sistema de tratamiento para sus aguas residuales que se contrastará con el entorno del lugar reduciendo el impacto visual y ambiental.

La comunidad presentaba una planta de lodos activos para el tratamiento de sus aguas grises la cual se ubica al lado del colegio de la comunidad, esta planta produce emanación de fuertes olores los cuales son totalmente perjudiciales para el colegio, sobre todo en época de calor (meses de marzo, noviembre y diciembre).

El humedal fue ubicado al lado de la planta de tratamiento para poder usar esta como lugar de recolección de aguas para luego ser llevadas hacia el humedal para seguir con un tratamiento biológico.

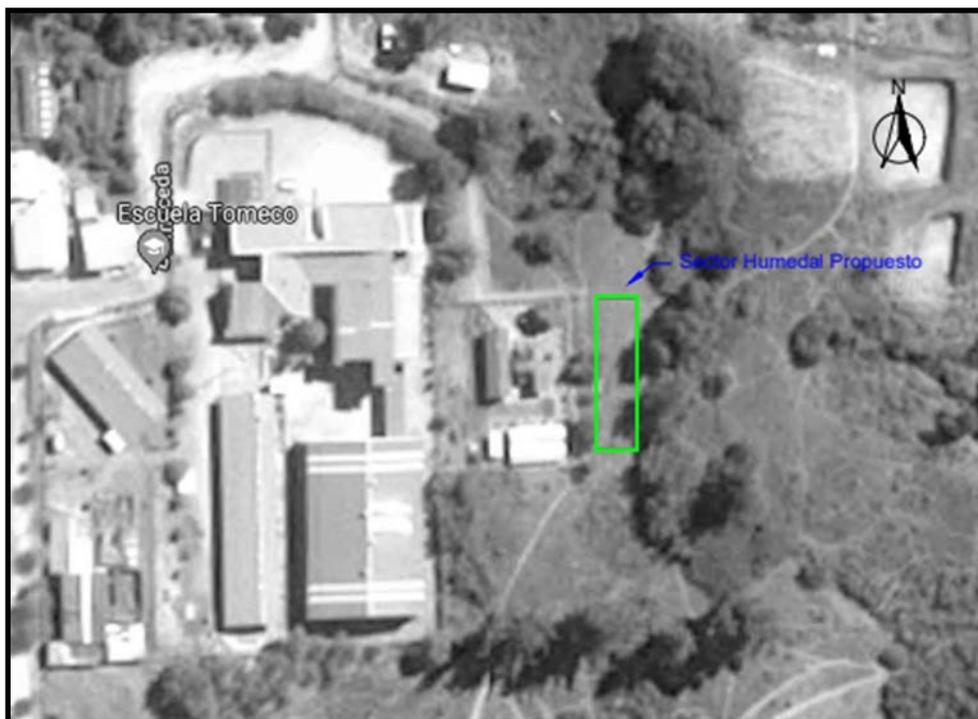


Figura 4. Cuadro de ubicación humedal artificial sub-superficial Tomeco. (Fuente propia)

Con la visita a terreno se constató que dada la geografía del lugar se presenta la siguiente situación: Tenemos un talud que conforma la pared oeste del humedal quedando expuesta una altura igual a 1.2 metros con un espacio disponible adyacente al talud igual a 0.4 metros, lo que impide una fijación de la membrana impermeable como la definida en el punto 2.2.4.2 del presente documento, la cual solo se podría llevar a cabo si las condiciones de terreno existente en el lugar de emplazamiento del humedal sean favorables en base a área disponible para llevar a cabo una fijación adecuada y paredes laterales del humedal que lo permitan esto dependerá de la altura sobresaliente del nivel del humedal que quede expuesta condiciones que no son favorables en este caso teniendo que llevar a cabo una fijación de la membrana de HDPE de manera no convencional en el talud quedando los bordes de esta expuestos.

A esto se suma la geografía del lugar adyacente al humedal que presenta desniveles de terreno que permiten el escurrimiento de las aguas lluvias caídas hacia el talud del humedal en estudio, generando una acumulación significativa de agua en época de invierno.



Figura 5. Constatación de acumulación de agua. (Fuente propia)

3.2. Determinación de flujo proveniente de escorrentía.

Es necesario determinar la cantidad de agua que llega al lugar de acuerdo a datos de precipitaciones en la zona, registros obtenidos por Estaciones Fluviométricas cercanas a la localidad, registros en base a precipitaciones diarias y mensuales en el transcurso del año 2018 entregados por el Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Aguas (DGA).

Determinando el área aportante de acuerdo a la geografía del lugar podemos obtener la cantidad de flujo en m^3 que podrían escurrir hasta la parte baja del talud.

3.3. Caracterización del suelo.

Tenemos un talud que sobresale significativamente del nivel de flujo del humedal quedando expuesto en una gran parte y el cual se encuentra adyacente al cerco de la planta de tratamiento existente, que presenta una escorrentía de agua proveniente de la superficie adyacente que interfiere negativamente en el humedal, por lo cual se deben realizar estudios para determinar el tipo de suelo presente y la permeabilidad para poder tratar la acumulación de agua entre la membrana de HDPE y la superficie del talud, realizando dos tipos de ensayos:

3.3.1. Ensayos de granulometría.

Su finalidad es obtener la distribución por tamaño de partículas presentes en una muestra de suelo. Así es posible también su clasificación mediante sistemas como AASHTO o USCS. El ensayo es importante para obtener el ángulo de inclinación que permitirá la estabilidad del talud evitando posteriores derrumbes y desprendimiento de material hacia el humedal.

Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente. Para suelos con tamaño de partículas mayor a 0,074 mm se utiliza el método de análisis mecánico, mediante tamices de abertura y numeración indicado

en la siguiente tabla. Para suelos de tamaño inferior, se utiliza el método del hidrómetro, basado en la ley de Stokes.

Tamiz (ASTM)	Tamiz (NCh) (mm)	Abertura real (mm)	Tipo de suelo
3"	80	76,12	Grava
2"	50	50,8	
1 1/2"	40	38,1	
1"	25	25,4	
3/4"	20	19,05	
3/8"	10	9,52	
Nº 4	5	4,76	Arena gruesa
Nº 10	2	2	Arena media
Nº 20	0,9	0,84	
Nº 40	0,5	0,42	
Nº 60	0,3	0,25	Arena Fina
Nº 140	0,1	0,105	
Nº 200	0,08	0,074	

Tabla 2. Numeración y abertura de tamices. (Fuente propia)

Los suelos que poseen algo de cohesión, según su naturaleza y cantidad de agua, pueden presentar propiedades que lo incluyan en el estado sólido, semisólido, plástico o semilíquido.

El contenido de agua o humedad límite al que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro. El método usado para medir estos límites se conoce como método de Atterberg y los contenidos de agua o humedad con los cuales se producen los cambios de estados, se denominan límites de Atterberg. Ellos marcan una separación arbitraria, pero suficiente en la práctica, entre los cuatro estados mencionados anteriormente.

Límite de Atterberg o de consistencia:

Atterberg definió los siguientes estados de consistencia según el contenido de agua en orden decreciente, para un suelo susceptible de ser plástico:



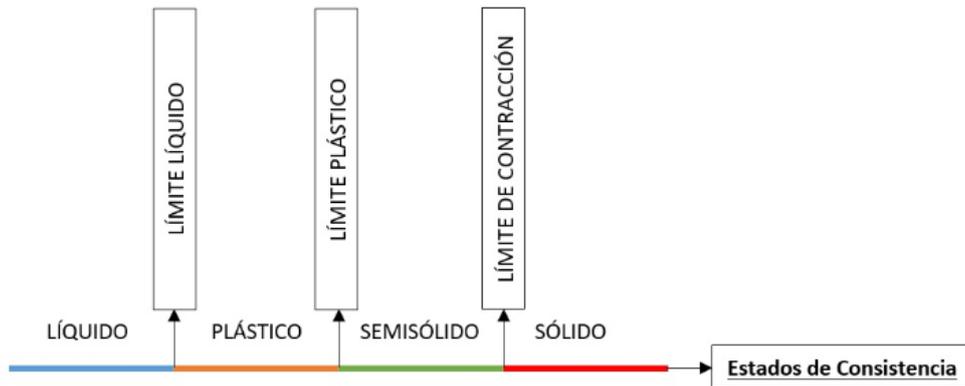


Figura 6. Estados de consistencia. Fuente (www.cuevadelcivil.com)

Para realizar el ensayo es necesario preparar la muestra y acondicionarla:

- El tamaño de muestra a utilizar es aproximadamente 200 g del material que pasa por el tamiz N°40 ASTM (0,5 mm), de los cuales, 160 gr se utilizaran para determinar el límite líquido y 40 gr para determinar el límite plástico, aproximadamente.
- Se debe desmenuzar los terrones existentes en la muestra con mortero, sin reducir el tamaño natural de las partículas individuales, posteriormente secar la muestra al aire o en horno a una temperatura que no exceda de 60°C.

Acondicionamiento de la muestra:

1. Colocar la muestra en un plato de evaporación. Agregar agua destilada y mezclar completamente con ayuda de una espátula hasta asegurar una mezcla homogénea.
2. Curar la muestra durante el tiempo necesario para que las fases líquida y sólida se mezclen homogéneamente. El tiempo de curado de la muestra depende del grado de plasticidad del suelo, para lo cual existe la siguiente clasificación.

- Suelos de alta plasticidad: ≥ 24 h
- Suelos de plasticidad media: ≥ 12 h
- Suelos de baja plasticidad: ≥ 1 h

Determinación del límite líquido:

- Mediante el uso de la Máquina casa grande se llevara a cabo el ensayo, para esto es necesario que la máquina sea ubicada en una base firme y plana.
- Posteriormente utilizando una espátula una porción de la masa de suelo deberá ser colocada en la Máquina casa grande centrándola en el punto de apoyo de la taza con la base, moldear la masa de suelo con la espátula, enrasa y nivelar a 10 mm en el punto de máximo espesor.

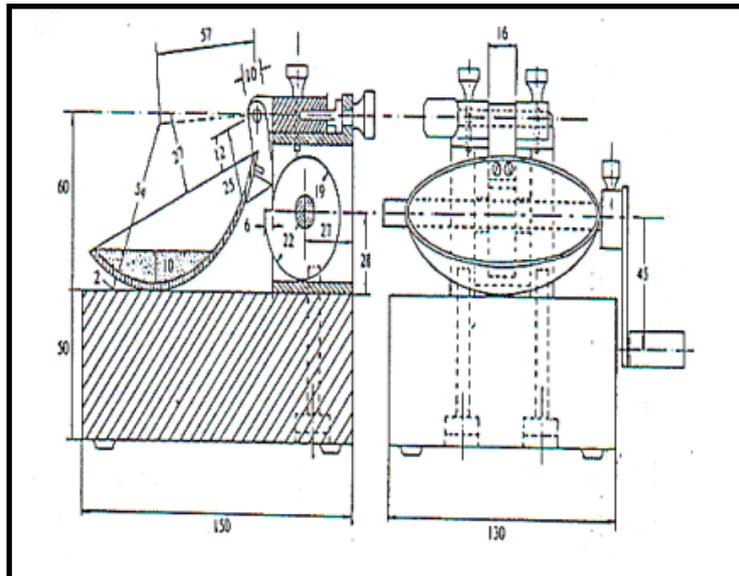


Figura 7. Maquina casa grande. Fuente (geotecnia-sor.blogspot.com)

- Dividir la pasta de suelo usando el acanalador pasándolo perpendicular a la superficie interior de la taza y cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza, de modo que se forme una ranura clara y bien delineada de dimensiones especificadas. La formación de la ranura se debe efectuar con el mínimo de pasadas, limpiando el acanalador en cada pasada.

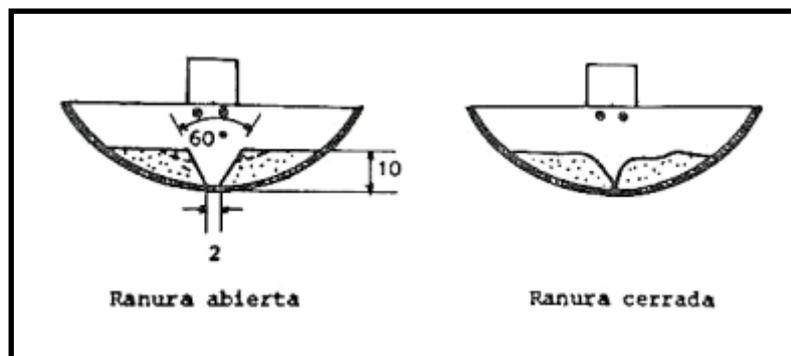


Figura 8. Forma de acanalado. Fuente (geotecnia-sor.blogspot.com)

- Una vez teniendo lista la ranura se girara la manivela levantando y dejando caer la taza con una frecuencia de 2 golpes por segundo, hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 10 mm. Registrar el número de golpes requeridos (N).
- Retirar aproximadamente 10 gr de material que se junta en el fondo del surco, luego colocarlos en un recipiente hermético y determinar su humedad (w).
- Transferir el material que quedó en la taza al plato de evaporación. Lavar y secar la taza y el ranurador.

- Continuar batiendo con la espátula la pasta de suelo que quedo en el plato de evaporación para obtener un secado homogéneo y repetir las operaciones precedentes al menos 4 veces.

Se recomienda que los puntos seleccionados se encuentren en el rango de 15 a 35 golpes.

Expresión e interpretación de resultados:

1. Calcular y registrar la humedad de cada prueba (w).
2. Construir un gráfico semi-logarítmico, con la humedad (w) como ordenada en escala aritmética y el número de golpes (N) como abscisa en escala logarítmica y ubicar los puntos correspondientes a los resultados de cada uno de los ensayos, construir una recta (curva de fluidez) que pase tan aproximadamente como sea posible por dichos puntos.
3. El limite liquido (LL) del suelo corresponde a la humedad que intersecta la curva de flujo con la abscisa en los 25 golpes.

Determinación limite plástico:

- Tomar una porción de la muestra de ensayo acondicionada de aproximadamente 1 cm^3 , amasar la muestra entre las manos y luego hacerla rodar con la palma de la mano o la base del pulgar sobre la superficie de amasado formando cilindros. Cuando el cilindro alcance un diámetro de aproximadamente 3 mm, doblar y volver a conformar el cilindro. Repetir la operación hasta que el cilindro se disgregue en trozos del orden de 0,5 a 1 cm de largo y no pueda ser reconstruido al llegar al diámetro deseado.

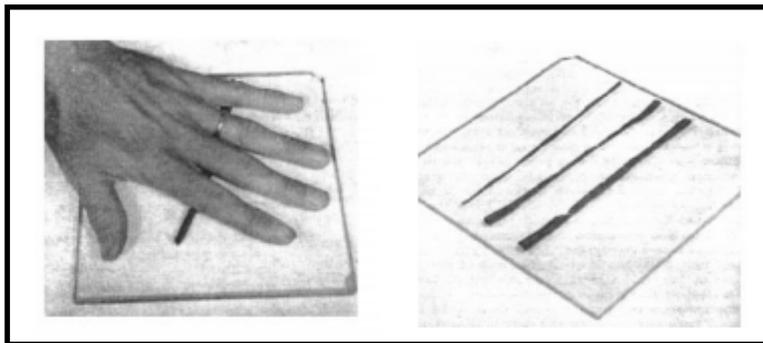


Figura 9. Conformación de cilindros. Fuente (apuntesingenierocivil.blogspot.com)

- Si esta disgregación se produce cuando el cilindro tiene un diámetro mayor que 3 mm, puede considerarse como un punto final satisfactorio siempre que el material haya podido conformar previamente un cilindro de 3 mm.
- Reunir las fracciones del cilindro disgregado y colocar en un recipiente tarado para posteriormente determinar y registrar su humedad (w).

- Repetir las pruebas con dos porciones más de la muestra de ensayo.

Expresión e interpretación de resultados:

1. El límite plástico (LP) es el promedio de las tres humedades determinadas.
2. El índice de plasticidad (IP) del suelo se determina con la formula siguiente:

$$IP = LL - LP$$

Dónde: IP: Índice de plasticidad del suelo (%)
 LL: Limite liquido del suelo (%)
 LP: Limite plástico del suelo (%)

Cuando no se pueda determinar uno de los dos limites (LL o LP), o la diferencia resulte negativa, informe el índice de plasticidad como NP (no plástico).

A lo largo del talud se extraerán muestras de suelo cada 10 metros de distancia, para asegurar un buen análisis de la totalidad del talud en caso de existencia de suelos con distintos comportamientos, la muestra extraída corresponderá a 500 gramos aproximados de materia los cuales deberán ser sacados una vez retirada la primera capa a ras de suelo expuesta a la superficie, ya que esta podría estar contaminada con algún tipo de material que no sea necesariamente el predominante en el lugar a estudiar.

Una vez determinado el tipo de suelo existente en el talud, se puede conocer el ángulo de inclinación que debe presentar para evitar algún desmoronamiento en el talud, a través de la siguiente podemos conocer rangos estimados de ángulos.

Grupos de suelos	Rango de ángulo de inclinación	
	Ángulo mín.	Ángulo máx.
GW	38,3°	-
GP	36,5°	-
GM	33,8°	-
GC	31,0°	-
SW	37,6°	38,3°
SP	35,7°	37,2°
SM	33,0°	34,6°
SM-SC	30,5°	36,1°
SC	28,0°	33,8°
ML	30,1°	33,4°
ML-CL	29,2°	34,2°
CL	26,6°	30,1°
OL	-	-
MH	22,8°	27,5°
CH	14,6°	23,7°
OH	-	-

Tabla 3. Rango de ángulos de inclinación según clasificación del suelo. (Fuente propia)

3.3.2. Ensayo Potcher de infiltración del suelo.

Este ensayo se deberá realizar en cada una de las partes del talud donde fueron extraídas muestras de suelo para su posterior clasificación. Este ensayo nos permite conocer en que partes del talud se producirán problemas de acumulación de agua entre el talud y el material impermeabilizante.

Para llevar a cabo este ensayo se realizara una perforación en forma cilíndrica en la superficie de diámetro y profundidad igual a 20 cm. En esta perforación será introducida una regla o huincha de medir, luego se llenara el orificio de agua y se procederá a realizar el ensayo. Con ayuda de un cronometro mediremos cuanto tiempo se demorara el agua de la perforación en descender una determinada longitud. La toma de datos (tiempo y longitud de descenso del agua) serán registrados dos veces consecutivas, dado que en la primera mediación se produce un efecto de saturación del suelo, teniendo que realizar una segunda medición para obtener el valor correcto para el análisis.

Como realizar el ensayo:

- Ajustar el nivel de agua en el agujero. Con una regla establecer un nivel de referencia, la cual se mantendrá durante todas las lecturas a partir del mismo punto.

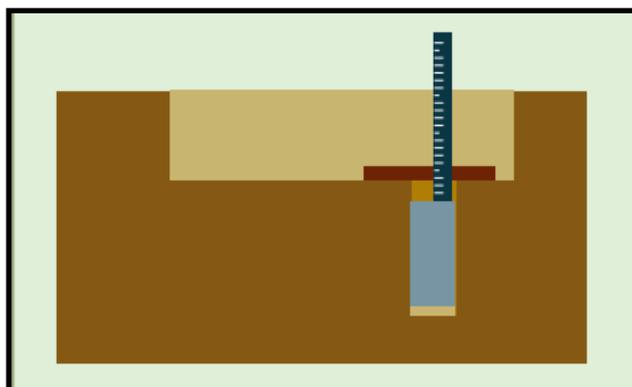


Figura 10. Primera etapa ensayo de infiltración. Fuente (cfia.or.cr/infiltración)

- Tomar la primera lectura del nivel del agua en el agujero de prueba una vez que el terreno se haya saturado.

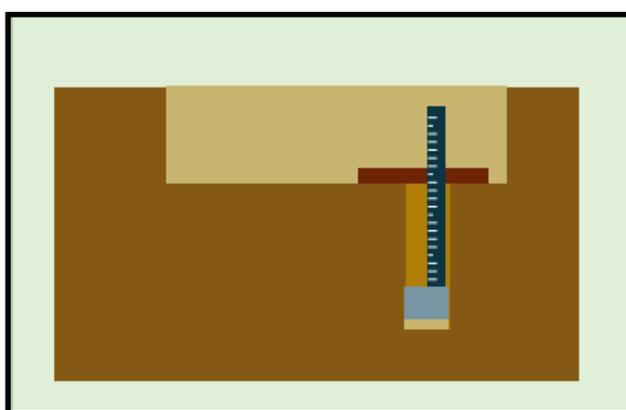


Figura 11. Segunda etapa ensayo de infiltración. Fuente (cfia.or.cr/infiltración)

- Si es necesario, se ajusta o reestablece el nivel del agua en el agujero y se hace una nueva lectura del nivel.

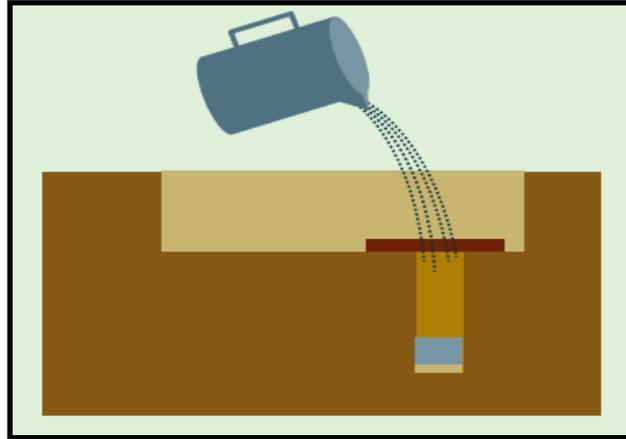


Figura 12. Tercera etapa ensayo de infiltración. Fuente (cfia.or.cr/infiltración)

Para este caso los datos solo serán usados para determinar la permeabilidad del suelo (K), donde K es igual a: $K = \frac{L}{\Delta t}$

Dónde: L= Longitud que ha descendido el nivel de agua. (cm)
 Δt = Tiempo transcurrido en descender L cm. (S)

Se considera impermeable un suelo con $k = 1,3 \times 10^{-8}$ cm/s.

3.4. Manejo de las aguas lluvias.

La acumulación de agua entre el material HDPE y el suelo debido a las escorrentías de agua dado el relieve de la superficie adyacente, realiza una fuerza tal que el borde del material impermeabilizante será empujado hacia el humedal al tener este un tipo de fijación no convencional, lo que puede provocar daños en las plantas ubicadas en el borde del humedal, y problemas significativos de arrastre de material al humedal, lo que a largo plazo tapanía los espacios disponibles entre el árido dispuesto en el humedal para el tratamiento del agua residual.

Por esta razón se deben conducir las aguas mediante un sistema de evacuación, la cuales podrán ser dirigidas hacia el interior del humedal o a la superficie adyacente.

3.4.1. Tubos para la conducción de las aguas.

La conducción de las aguas se realizará mediante la utilización de tubos deben presentar orificios que permitan el ingreso del agua, estos deberán tener perforaciones longitudinales en su parte superior (L-1, L-2, L-3) permitiendo el desplazamiento del flujo por su parte inferior para su posterior evacuación hacia el interior del humedal.

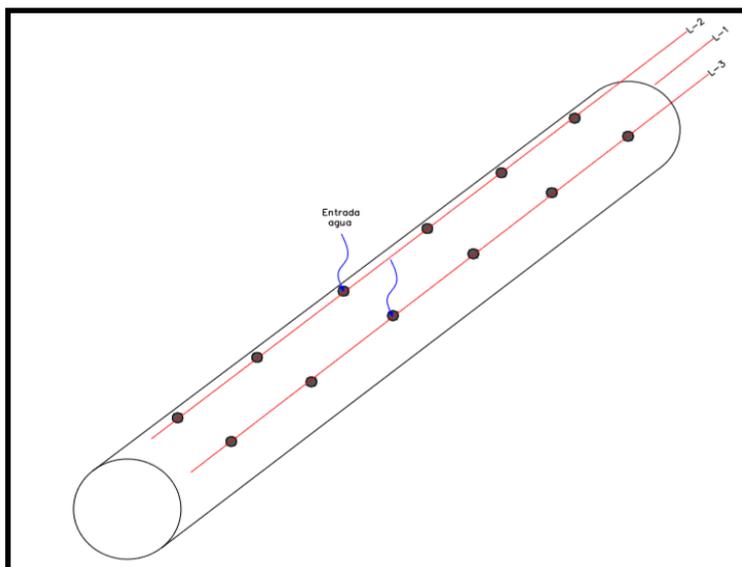


Figura 13. Esquema para perforaciones de tubos. (Fuente propia)

3.4.2. Preparación del terreno.

Posteriormente será definida una pendiente en el terreno donde se montará el sistema de drenaje que permita el continuo escurrimiento de flujo por el interior de este, de manera que tanto el agua recolectada por los orificios como también por los extremos de los tubos sea conducida a la parte más baja del dren evacuándola.

3.4.3. Descarga de caudal controlado de agua en la zona de interfase entre suelo y el material impermeabilizante.

El agua tendrá un área disponible de escurrimiento por el interior del dren igual a $\frac{\pi r^2}{2}$, lo que corresponde a la mitad inferior del tubo de PVC, con este dato podemos determinar el caudal de descarga que drenará el sistema teóricamente.

De esta manera el flujo de agua hacia el interior del humedal se conducirá mediante el uso de una unión T que permita la salida del agua y unión de los tubos de drenaje.

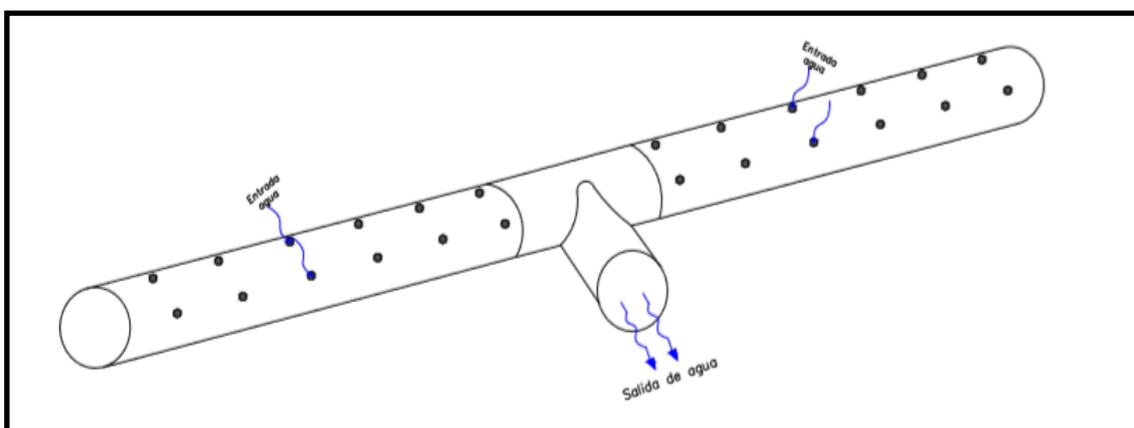


Figura 14. Montaje del sistema de drenaje. (Fuente propia)

Esta unión T introducirá el flujo de agua hacia el humedal por medio de una perforación en la membrana de HDPE de igual tamaño que la unión (75 mm), la cual será realizada a 10 cm sobre el nivel de flujo propio del humedal.

3.5. Parámetros del sistema de manejo de aguas.

Para obtener los parámetros de medición para el sistema de manejo implementado es necesario simular una lluvia artificial, mediante el uso de una manguera con caudal igual a 4,4 lt/s, la cantidad de agua estimada para realizar el estudio son aproximadamente 3 m³, los cuales serán sacador de la acumulación de agua en la cámara acondicionadora de lodos, de esta manera se reutiliza el agua no malgastando el recurso.

Mediante el uso de un cronometro se registraran los tiempos empleados para cada medición y determinando el volumen de agua caído en cada caso.

3.5.1. Medición del nivel de acumulación de agua.

El nivel de agua acumulada dependerá de la permeabilidad del suelo, la intensidad de lluvia y del tiempo por el que se prolongue dicho suceso, teniendo este también un nivel máximo que corresponderá a la cota donde el dren comienza a operar.

3.5.2. Aforo del agua que sale por el dren e ingresa al humedal.

Finalizado el proceso de instalación del dren es necesario medir el caudal operacional real del dren. Para este tipo de medición se deben proporcionar condiciones de agua similares a la cantidad de agua caída que podría provocar una lluvia habitual de invierno en el sector mediante el uso de mangueras que permitan abastecer el lugar de agua, dado a que nos encontramos en época de verano donde las lluvias son escasas para poder realizar una medición de este tipo.

Mediante aforo se evaluara la cantidad de agua que es capaz de drenar el sistema en un tiempo dado una vez que se encuentre saturado el terreno, obteniendo un valor experimental que podrá ser comparado con el valor teórico que se obtendrá de acuerdo al área disponible del sistema para el escurrimiento del flujo, definiendo de esta manera la eficiencia del dren.

3.6. Arrastre de material hacia la tubería provocado por la escorrentía y fijación del material HDPE.

La escorrentía que será captada por el sistema de drenaje aparte de traer consigo el agua lluvia generara un arrastre de material que perjudicara el funcionamiento del dren a mediano o largo plazo, por lo tanto, es necesario evitar este acontecimiento mediante el recubrimiento de la superficie del talud con vegetación.

Para tener una idea de la cantidad de material que será arrastrado por la lluvia con y sin capa vegetal, se dispondrá de 0,5 m² de pasto natural que serán colocados sobre el talud, sobre este se hará fluir una cantidad de agua que permitirá determinar la cantidad de material que fue arrastrado.

El borde del impermeabilizante deberá ser fijada mediante la dispersión de grava, de esta manera el material no será visible y se mejorara tanto el aspecto constructivo como visual del humedal.

4. Desarrollo y Resultados

4.1. Estudio hidrológico del lugar.

4.1.1. Precipitaciones máximas.

Para el análisis de las precipitaciones máximas en el lugar es necesario determinar la Estación Pluviométrica más cercana a la zona para poder acceder a los registros de precipitaciones del año 2018, el acceso a estos registros se realiza a través de las páginas de “Información Oficial Hidrometeorológica y de calidad de agua en línea” (snia.dga.cl).

Ubicada a una distancia aproximada de 24 kilómetros al sureste de la localidad de Yumbel se encuentra la Estación Meteorológica llamada RIO LAJA AG.ARR. DEL SALTO (REC.R.LAJA) perteneciente a la comuna de Los Ángeles, cuya cuenca hidrográfica corresponde al Rio Bio-Bio.



Figura 15. Ubicación de Estación Meteorológica utilizada para el análisis. (Fuente propia)

Los registros entregados nos dicen que el mes del año 2018 que presenta mayores precipitaciones es el mes de Mayo.

AÑO 2018												
DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,50					
2	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70	0,10	0,00					
3	0,60	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	13,70					
4	3,70	0,00	0,00	0,80	0,00	0,70	3,20					
5	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	11,60	11,20					
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,10	4,20					
7	0,00	0,00	0,00	0,00	3,70	10,40	0,00					
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,10	0,00					
9	0,00	0,00		27,30	0,00	8,40	0,00					
10	0,00	0,00	0,00	25,70	0,00	11,20	0,00					
11	0,00	0,00	0,00	1,60	0,10	0,00	0,00					
12	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00					
13	0,00	0,00	0,00	0,00	4,60	0,10	2,00					
14	0,00	0,00		0,00	1,10	0,00	0,30					
15	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00					
16	0,00	0,00		0,00	6,50	0,00	0,00					
17	0,00	0,00		0,00	2,00	0,00	0,00					
18	0,00	0,00		0,00	0,00	0,10	0,00					
19	0,00	7,10		0,00	0,40	0,00	0,00					
20	0,00	0,10		0,00	0,60	0,10	0,00					
21	0,00	0,00	0,00	3,90	0,00	0,10	3,60					
22	0,00	0,30		0,10	0,00	0,50	0,00					
23	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00					
24	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00					
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	9,50	0,00					
26	0,00	0,00		7,90	7,20	15,40	0,10					
27	0,00	0,00	0,00	0,00	23,80	3,00	0,30					
28	0,00	0,00		0,00	54,20	0,80	0,00					
29	0,00		0,00	0,00	0,00	0,20	0,00					
30	0,00		0,00	1,70	1,00	0,20	0,00					
31	0,00		0,00		0,10		0,00					

Tabla 4. Precipitaciones diarias (mm) Periodo: 01/01/2018 - 31/12/2018. (Fuente propia)

El año 2018 los meses de Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre dado que tienen menos de 10 días con información al mes no presentan registro alguno, sin embargo el mes de Mayo fue el que presento una mayor cantidad de precipitación con un total de 107,9 mm de agua caída, sin embargo el día en el año que se presentó una precipitación máxima en 24 horas fue el 28 de Mayo donde precipito un total de 54.2 mm de agua.

La precipitación correspondiente a 24 horas con periodo de retorno de 20 años en la octava región es de 131 mm (Dato de acuerdo a registros y análisis del Minvu), si comparamos este valor con la máxima precipitación ocurrida durante el 2018 (54.2 mm), esta corresponde a la mitad de agua que podría caer analizando un periodo de retorno igual a 20 años.

4.1.2. Determinación del área aportante.

El área aportante corresponde a la totalidad en m² de superficie adyacente cuya escorrentía de agua lluvia cae en el talud.

Para disminuir en parte la escorrentía se realizó una zanja que recibe el agua antes que esta llegue al talud, conduciéndola hasta un canal de drenaje existente en el lugar. Disminuyendo el área aportante a 180 m² aproximadamente.

Se sugiere realizar un canal revestido definitivo que remplace la zanja existente, para una mejor recepción y conducción de las aguas antes que estas ingresen al humedal disminuyendo aún más el área aportante.



Figura 16. Zanja y canal de drenaje. (Fuente propia)



Figura 17. Identificación del área aportante. (Fuente propia)

4.1.3. Cantidad máxima de agua que podría llegar al talud.

La cantidad de agua máxima que puede llegar al talud queda definida por la precipitación máxima en 24 horas y el área de suelo aportante.

Generando un total de 9.8 m³ de agua que podrían escurrir hasta el borde de la membrana con el talud en un día.

El volumen del humedal es de 72 m³, donde el agua que podría escurrir hasta el humedal debido a lluvias correspondiendo a un 14 % de este volumen.

Esto provoca un efecto sobre el tiempo de residencia hidráulico del caudal del humedal.

El caudal normal del humedal es de 20 m³ (Tesis Joaquín Maurería), si a esto sumamos el caudal proveniente de la escorrentía nos queda un caudal total de 29.8 m³.

El tiempo de residencia hidráulico para ambos queda determinado por el volumen dividido por el caudal.

$$TRH_{Normal\ del\ humedal} = \frac{72\ m^3}{20\ \frac{m^3}{día}} = 3.6\ días$$

$$TRH_{Total\ del\ humedal} = \frac{72\ m^3}{29.8\ \frac{m^3}{días}} = 2.4\ días$$

El tiempo de residencia hidráulico disminuye pero sigue siendo un valor aceptable, si a esto le restamos la cantidad de agua que se infiltrara en el suelo (0.5 m³ aprox.), nos queda un caudal de salida igual a 29,3 m³ quedando un TRH final igual a:

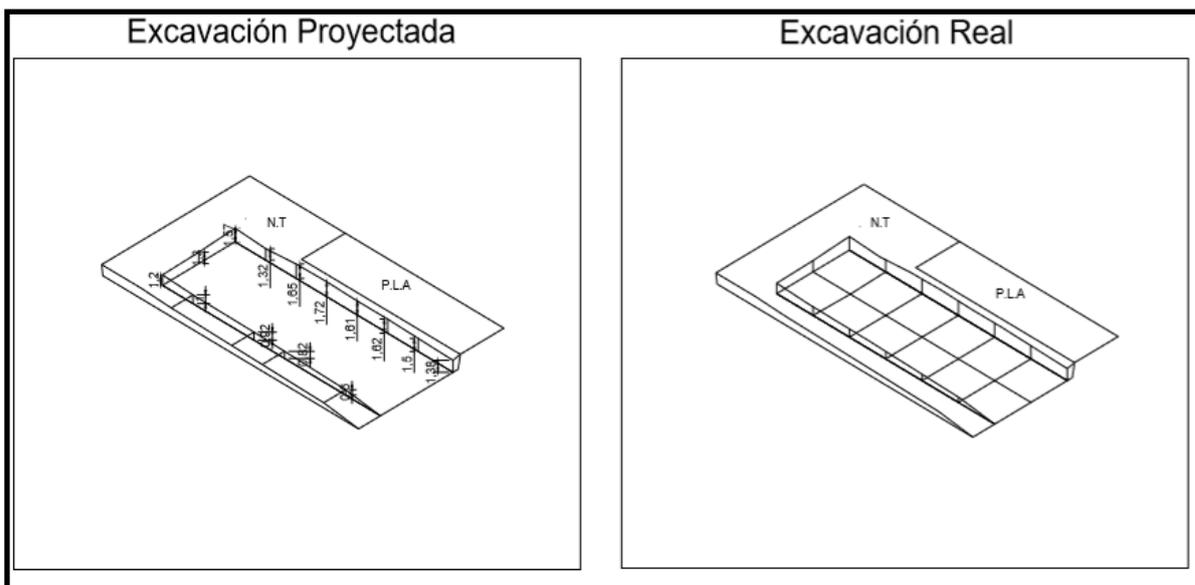
$$TRH_{Final\ del\ humedal} = \frac{72\ m^3}{29.3\ \frac{m^3}{días}} \approx 2.5\ días$$

4.2. Estudio y caracterización del tipo de suelo existente en el talud.

El talud comprometido presenta una longitud de 30 metros y una altura aproximada de 1.5 metros de los cuales 30 cm se encuentran limitados por el medio granular presente en el humedal para el tratamiento de aguas.

Antes de tomar cualquier tipo de decisión al respecto del talud es necesario determinar qué tipos de suelos conforman el lugar, se pueden apreciar a simple vista dado su color y textura 2 tipos de suelo totalmente distinto.

Para la construcción del humedal se llevó a cabo un estudio topográfico para determinar los puntos de la excavación correspondiente, con estos datos se puede apreciar que el talud comprometido no presenta ángulo de inclinación, donde el corte realizado para la excavación fue de 70° aproximados.



**Figura 18. Excavación proyectada y real para la construcción del humedal sub-superficial.
P.L.A : Planta Lodos Activos.**



Figura 19. Realización de la excavación. (Fuente propia)

4.2.1. Granulometría.

Se extrajeron dos muestras de suelo a lo largo del talud separadas a una distancia de 15 metros cada una conformada por 600 gramos aproximados de material, las cuales fueron llevadas al laboratorio para su posterior análisis granulométrico.

Una vez preparadas las muestras lavadas y secadas se dispuso a realizar el paso de estas por los tamices de numeración (3/8; 4; 10; 40; 200), obteniendo el porcentaje de suelo que pasa en cada tamiz como también el que queda retenido.



Figura 20. Orden De tamices para realizar granulometría. (Fuente propia)

Estudio Muestra N°1: Peso real 739 gr

Muestra N°1	739 gr		
Tamiz N°	Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Que pasa
3/8	0	0	100
4	10,7	1,4	98,6
10	123,6	16,7	81,9
40	396,3	53,6	28,3
200	116,1	15,7	12,6
Residuo	92,3	12,5	

Tabla 5. Granulometría Muestra N°1. (Fuente propia)

Con el porcentaje de suelo que pasa en cada tamiz se procede a la clasificación del mismo dando como resultado para la Muestra 1 (lado derecho del talud) un suelo tipo SM (Arena limosa).

Sistema	Clasificación
USCS	SM
AASHTO	A-1-b (0)

Estudio Muestra N°2: Peso real 570 gr

Muestra N°2	570 gr		
Tamiz N°	Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Que pasa
3/8	0	0	100
4	6,3	1,1	98,9
10	56	9,8	89,1
40	238,3	41,8	47,3
200	104,8	18,4	28,9
Residuo	164,6	28,9	

Tabla 6. Granulometría Muestra N°2. (Fuente propia)

Debido a que el porcentaje de suelo que pasa por el tamiz 200 es superior a 25% se procede a realizar ensaye de determinación de límite líquido utilizando el equipo Casa Grande y el límite plástico.

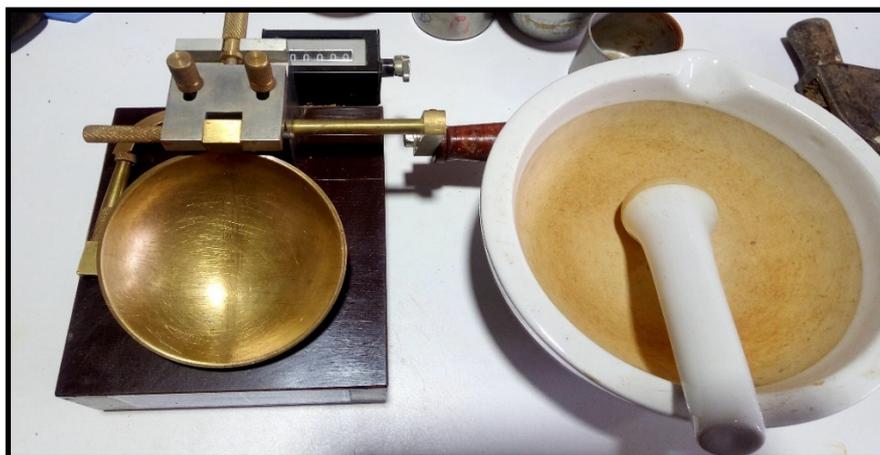


Figura 21. Equipo Casa Grande. (Fuente propia)



Figura 22. Determinación de límite líquido utilizando maquina Casa Grande. (Fuente propia)

FICHA DE ENSAYE									
DETERMINACIÓN DE LÍMITE LIQUIDO Y LÍMIT PLÁSTICO									
ENSAYE N°	LÍMITE PLÁSTICO					LÍMITE LIQUIDO			
	1	2	3	1	2	3	4	5	
CÁPSULA N°	CL-3	LC-1	AC	LC-5	CL-4	CL-1	LC-3	AB	
NÚMERO DE GOLPES	-	-	-	14	16	21	29	34	
1 PESO CÁPSULA + SUELO HUM. (g)	27,07	25,27	29,84	34,74	40,68	38,8	36,06	42,69	
2 PESO CÁPSULA + SUELO SECO. (g)	26,7	24,9	29,4	32,2	37,3	36	33,1	39,3	
3 PESO DE LA CÁPSULA (g)	24,07	22,61	26,74	22,06	23,03	23,81	19,9	23,62	
4 PESO DEL AGUA (1-2) (g)	0,37	0,37	0,44	2,54	3,38	2,8	2,96	3,39	
5 PESO DEL SUELO SECO (2-3) (g)	2,63	2,29	2,66	10,14	14,27	12,19	13,2	15,68	
6 HUMEDAD (4/5)*100 (%)	14,1	16,2	16,5	25,0	23,7	23,0	22,4	21,6	
7 PROMEDIO LÍMITE PLÁSTICO (%)		15,6							

Tabla 7. Ficha determinación límite líquido y plástico (Fuente propia)

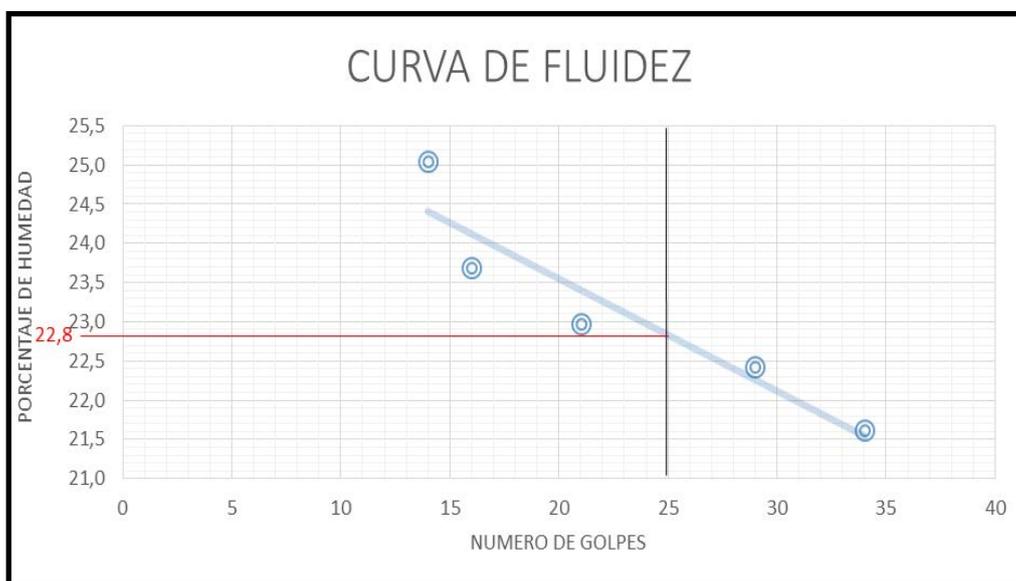


Figura 23. Grafico Cuerva de fluidez. (Fuente propia)

Parametros	Porcentaje
Límite Líquido (LL)	22,8
Límite Plástico (LP)	15,6
Indice de Plasticidad (IP=LL-LP)	7,2

La Muestra 2 (lado izquierdo del talud) presenta un suelo SM-SC (Arena con presencia de limo y arcilla)

Sistema	Clasificación
USCS	SM-SC
AASHTO	A-2-4 (0)

La longitud del talud en la cual se encuentra presente el suelo con clasificación SM son 19 metros en total, los cuales en su totalidad se ubican adyacente al cierre perimetral de la planta

de tratamiento, lo cual es un área totalmente nivelada sin escurrimiento de agua hacia el talud, sin embargo los otros 11 metros del talud compuestos por suelo tipo SM-SC se encuentran en la esquina sur del talud quedando expuesto a las escorrentías de agua proveniente de desniveles en la superficie adyacente al lugar.



Figura 24. Referencia de ubicación de los distintos tipos de suelo. (Fuente propia)

Teniendo la clasificación del suelo se procede a determinar el ángulo de inclinación que debe presentar cada una de las partes del talud según lo definido en la tabla (3), es necesario establecer estos ángulos de inclinación y/o pendientes para garantizar la estabilidad del talud, evitando posible deslizamientos de suelo que al ser desprendidos al interior del humedal perjudicaría el tratamiento de las aguas, debido a que tapanía los espacios vacíos entre el medio granular para la circulación del agua.

Grupos de suelos	Rango de ángulo de inclinación	
	Ángulo mín.	Ángulo máx.
SM	33,0°	34,6°
SM-SC	30,5°	36,1°

Tabla 8. Angulo de inclinación. (Fuente propia)



Figura 25. Perfilado del talud para definición de pendientes. (Fuente propia)

Los ángulos finales definidos en el talud fueron aproximados a 40° en toda su longitud definido por el espacio disponible.



Figura 26. Angulo definido del talud. (Fuente propia)

4.2.2. *Ensayo potcher.*

Se llevaron a cabo dos Ensayos Potcher en el mismo lugar donde fueron extraídas las muestras para el ensayo granulométrico, este ensayo nos permite determinar la permeabilidad de cada uno de los suelos presentes en el lugar.



Figura 27. Ensayo Potcher N°1 suelo SM. (Fuente propia)



Figura 28. Ensayo Potcher N°2 suelo SM-SC. (Fuente propia)

Tipo de suelo	Infiltración (m)	Tiempo de infiltración (s)	Permeabilidad K (m/s)
SM	0,0254	37	6,9E-04
SM-SC	0,0254	2494	1,02E-05

Tabla 9. Datos obtenidos ensayo Potcher. (Fuente propia)

En base a los datos obtenidos la parte izquierda del talud que colinda con la planta de tratamiento presenta un suelo muy permeable la cual no presentará problemas de acumulación de agua ya que esta será absorbida rápidamente por el mismo terreno. En esta parte del talud solo será necesario un sistema de fijación del borde la membrana.

La parte derecha del talud presenta una permeabilidad muy baja lo que produce graves problemas de acumulación de aguas lluvias por lo tanto es indispensable implementar un sistema externo para la conducción de las aguas, el cual podrá ser hacia el interior del humedal o a la superficie exterior directamente.

4.3. Instalación del drenaje para la evacuación de la esorrentía hacia el Humedal.

En una de las paredes del humedal, debido a su topografía se realizó una sujeción de la membrana de HDPE no convencional que favorece la acumulación de agua en el lugar, aguas que deben ser conducidas de manera que no perjudique el funcionamiento de este.

Para la conducción de las agua lluvias en el lugar es implementado un sistema de drenaje en base a tubos de PVC de 70 mm de diámetro, los cuales serán dispuestos a lo largo de los 11 metros del talud donde encontramos Arena limosa con baja permeabilidad.

Los tubos utilizados para el dren presentaran tres líneas de perforaciones a lo largo del tubo para permitir el ingreso del agua, dejando sin orificios la mitad inferior del tubo favoreciendo el flujo de agua por esta área disponible la cual corresponde a:

$$A = \frac{\pi * r^2}{2} = \frac{\pi * 35^2}{2} = 1924.2 \text{ mm}^2 = 19.24 \text{ cm}^2$$

El flujo de agua que va a ser capaz de transportar el sistema de drenaje va a ser igual al área disponible para el escurrimiento y el largo total del sistema de drenaje.

$$\text{flujo} = \text{Área} * \text{Longitud del dren.} = 19.24 * 1100 = 21164 \text{ cm}^3$$



Figura 29. Preparación de perforaciones en tubos del dren. (Fuente propia)

El terreno donde estarán colocadas las tuberías de captación de agua debe presentar una pendiente ascendiente desde la salida de agua del sistema (misma pendientes que adoptaran las tuberías una vez dispuestas en el lugar), de esta manera se permitirá un escurrimiento permanente del flujo de agua que ingrese al dren.

Se definió al lado izquierdo de la salida del dren una pendiente igual a 1,5 %, y al lado derecho una pendiente de 1,8 %.

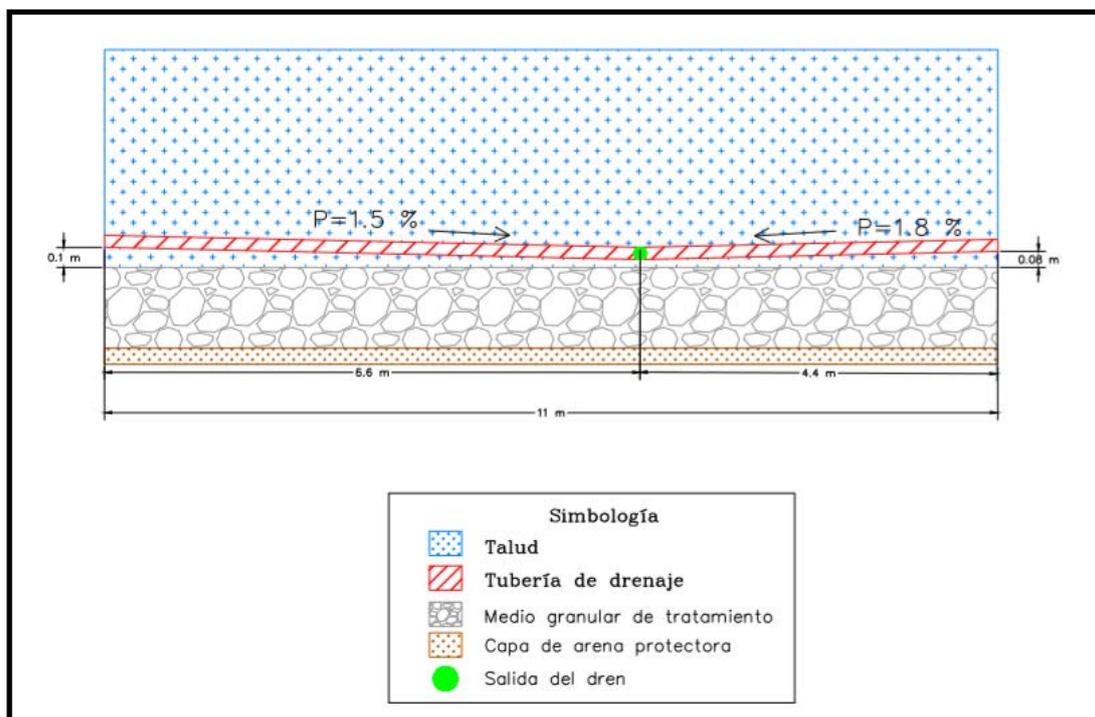


Figura 30. Pendientes adaptadas para el sistema de drenaje. (Fuente propia)



Figura 31. Instalación del sistema de drenaje. (Fuente propia)

4.3.1. Descarga de caudal controlado de agua.

El flujo de agua capturado por el dren será ingresado al interior del humedal, siguiendo estas aguas el tratamiento dispuesto por el humedal aumentando el caudal de salida hasta en un 46% cuando las lluvias en la zona sean significativas.

Para permitir el ingreso de las aguas al humedal se realizó una perforación en el material de HDPE a altura de 15 cm sobre el nivel de agua del humedal para impedir el traspaso de contaminantes provenientes del agua residual desde el humedal a la superficie.



Figura 32. Salida del drenaje hacia el humedal utilizando una unión T. (Fuente propia)

En la perforación del material impermeabilizante se ingresa una unión T, que dirigirá el flujo a la zona de interfase entre el material HDPE y el suelo en el interior del humedal y a su vez permitirá unir los tubos de PVC usados para el drenaje, esta unión T se ubicara en la mitad de la longitud del talud y los tubos de drenaje saldrán desde esta, con pendiente ascendiente.

4.4. Estudio de parámetros del sistema de drenaje.

Para realizar un estudio operacional del dren es necesario conocer el nivel de acumulación de agua en el lugar y realizar una medida de la cantidad de agua que sale del dren e ingresa al humedal mediante aforo, para ambos análisis es necesario simular una lluvia artificial.

Medición	Tiempo (s)	Volumen (lt)	Altura acumulación ALL (cm)	Situación
1	75	328,5	3	Saturación terreno
2	140	536,8	7	Acumulación máxima
3	15	65,55	<7	Aforo
4	10	43,8	>7	Aforo

Tabla 10. Lluvias Artificiales de simulación. (Fuente propia)

4.4.1. Medición del nivel de acumulación de agua en el lugar de drenaje.

El nivel de agua dependerá de la cantidad e intensidad de lluvia caída como también del tiempo de ocurrencia y la permeabilidad del suelo.

Simulando una lluvia artificial a través del uso de una manguera con capacidad de flujo igual a 4,4 lt/s medidos por aforo. El lugar fue saturado durante 75 segundos, lo que equivale a una cantidad de agua igual a 328,5 lt, lo cual produjo un nivel de agua acumulada de 3 cm.



Figura 33. Simulación de lluvia artificial sobre el talud. (Fuente propia)

Luego de ser absorbida la totalidad de agua acumulada se abasteció de agua nuevamente el lugar hasta que el nivel de agua acumulada fuera constante, es decir, no tuviera alguna variación tardando 2,2 minutos produciendo una cantidad de agua caída igual a 536,8 lt a lo largo del talud, mediante el uso de una regla se procedió a medir la cantidad de agua acumulada en varios puntos del drenaje determinando un nivel máximo de agua acumulada en el lugar de 7 cm, ubicándose este punto en la perforación del tubo más cercano al suelo.



Figura 34. Medición del nivel de agua acumulado. (Fuente propia)

Esto se debe a que antes que el agua se encuentre con la perforación más baja del tubo se produce drenaje del agua por abajo de las tuberías debido a la pendiente que se definió en la superficie. Si bien se produce evacuación del agua que se va acumulado este proceso es más lento y el nivel de agua sube progresivamente hasta que ingresa al interior del drenaje produciéndose una evacuación constante lo que impide que el nivel de acumulación siga aumentando.



Figura 35. Flujo de agua que drena bajo la tubería. (Fuente propia)

4.4.2. Aforo de agua que sale por el dren e ingresa al humedal.

Utilizando la técnica de aforo se determinó la cantidad de agua que es capaz de drenar el sistema por segundo, para esto utilizamos un tarro cilíndrico con capacidad de 20 lt el cual fue ubicado en la salida del dren hacia el interior de humedal, y se procedió a medir durante una cantidad de tiempo determinado, luego se mide el volumen de agua en el recipiente y se divide por el tiempo de ingreso.

Esta evaluación fue dividida en dos fases:

- Cuando el nivel de agua acumulado es inferior al máximo.

Se dice que el nivel de agua acumulada es inferior al nivel máximo cuando la acumulación de agua en el lugar es menor a 7 cm (valor determinado en el punto 4.4.1), como fue evaluado en el punto anterior en esta fase la mayor cantidad de agua drenada se produce debido a la pendiente definida en el terreno bajo el sistema de drenaje, el agua drenada por el sistema es solo la capturada mediante las perforaciones superficiales del dren, es decir, flujo que ingresa debido a la caída de agua como lluvia.

Se determinó la cantidad de agua drenada por el sistema durante **15 segundos**.

El volumen de agua que ingreso al recipiente se determina mediante la siguiente formula:

$$Volumen = \pi * r^2 * h$$

Dónde: r = Radio del recipiente (0,15 m)

h = Altura de agua (0,11 m)

$$V. de agua = \pi * 0,15^2 * 0,11 = 7,8 \times 10^{-3} m^3$$

Quedando definida la cantidad de agua drenada por segundo como el cociente entre el Volumen de agua en litros y la duración en segundos.

$$C. agua drenada = \frac{7,8}{15} = 0,52 \text{ lt/s}$$

Durante los 15 segundos medidos el total de agua caída en el lugar fue de **65,55 lt**, donde **57,75 lt** fueron drenados solo por la pendiente del terreno, es decir, solo el **12%** del total de agua caída fue capturada por el dren y evacuada por el sistema establecido.

- Cuando el nivel de agua acumulada llega al máximo.

Cuando el nivel de agua acumulada llega a su punto máximo (7 cm) el agua comienza a drenar simultáneamente bajo el dren y por el interior del dren lo que suma una mayor cantidad de agua al interior del sistema.

Se determinó la cantidad de agua drenada por el sistema durante **10 segundos**.

Altura de agua en recipiente fue de **0.27 m**.

El volumen de agua en el recipiente es igual a:

$$V. de agua = \pi * 0,15^2 * 0,27 = 1,9 \times 10^{-2} m^3$$

Quedando definida la cantidad de agua drenada por segundo como el cociente entre el Volumen de agua en litros y la duración en segundos.

$$C. agua drenada = \frac{19}{10} = 1,9 \text{ lt/s}$$

Durante los 10 segundos transcurridos el total de agua caída en el lugar fue de **43,8 lt** de los cuales fueron drenados por el sistema **19 lt**, lo que equivale a un **43,4 %** del total de agua caída durante los 10 segundos siendo esta evacuada por el sistema de drenaje implementado.



Figura 36. Flujo ingresante en el sistema de drenaje. (Fuente propia)

4.5. Prueba de arrastre de material y fijación del borde del material impermeabilizante.

4.5.1. Arrastre de material hacia la tubería de drenaje.

Al momento de realizar la lluvia artificial y tomar los datos de drenaje del sistema, se apreció un arrastre de material considerable, el que podría a largo plazo generar problemas en la tubería de drenaje tapando los orificios de entrada del agua.

Una solución a esta problemática, sería la vegetación del talud que quede expuesto a la caída de la lluvia. Para respaldar dicha afirmación se realizó una prueba para determinar el arrastre de material mediante el uso de una manga de vegetación dispuesta en el lugar en conjunto con un dispositivo diseñado para recoger el agua y luego filtrarla.

La manga de vegetación utilizada cubre un área de 0,5 m² (área 2). Una vez dispuesta en el lugar se verterá sobre ella una cantidad de agua igual a 6 litros en forma de lluvia siendo esta recolectada al pie de la vegetación y filtrada de manera de poder determinar solo la cantidad de material que fue arrastrado.

Luego en una superficie de igual área (área 1), esta vez sin vegetación, serán vertidos 6 litros de agua que serán recolectadas para poder comparar ambas cantidades de materiales arrastrados.



Figura 37. Área 1 y 2 utilizadas para el ensayo. (Fuente propia)

- Toma de muestras en zona 1, sin vegetación.



Figura 38. Determinación arrastre de material sin capa vegetal. (Fuente propia)

- Toma de muestras en zona 2, con vegetación.



Figura 39. Determinación arrastre de material implementando vegetación. (Fuente propia)

Una vez terminado el ensayo las muestras fueron dispuestas en un recipiente para su posterior secado y pesado.



Figura 40. Recipientes con muestra posterior al ensayo. (Fuente propia)

Las muestras fueron dejadas durante 24 horas al sol para su secado y luego fueron pesadas para su análisis.



Figura 41. Muestras secas y pesadas. (Fuente propia)

El arrastre de material que se produce en el terreno sin capa vegetal es considerablemente superior a la cantidad de material arrastrado cuando está dispuesta alguna, comparando ambas cantidades el arrastre de material que genera el agua sin capa vegetal es **7,75 veces mayor**, por esta razón es recomendable el recubrimiento del talud con una capa vegetal ya sea pasto, flores o simplemente algún tipo planta que sea de rápida dispersión.

Esta medida tiene como finalidad disminuir el arrastre de material granular hacia el drenaje, y también evitar la erosión del talud debido al impacto proporcionado por la caída de lluvia directamente sobre la superficie.

Una planta recomendable para el recubrimiento de taludes es la denominada Doca ya que es una planta que crece tanto en elevaciones bajas como en valles del interior y cordilleras de la costa, dura sin precipitaciones entre 3 a 5 meses y es de rápida propagación.

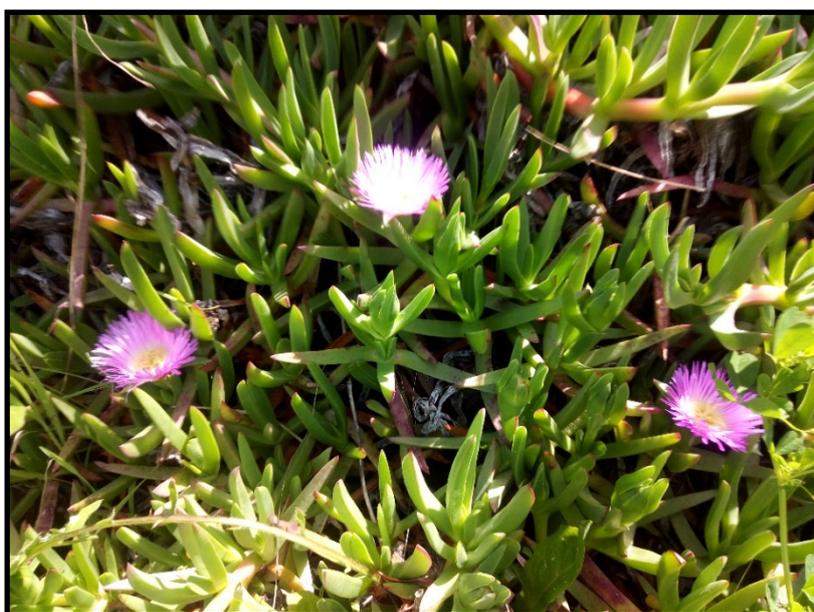


Figura 42. Planta Doca, Frutilla del mar. (Fuente propia)

4.5.2. Fijación del borde del material impermeabilizante.

Si bien el escurrimiento de agua lluvia hacia la membrana impermeable ya no es un preocupación una vez implementado el sistema de drenaje, se tiene el borde de la membrana aun sin fijar lo que genera un aspecto poco amigable del humedal, perdiendo la continuidad de la zona verde de plantación, la cual es intervenida por la membrana de color negro.

Para ellos se decidió cubrir el borde de la membrana con material granular lo que genera una contención extra de la membrana, como también una protección al pie del talud y para el sistema de drenaje implementado, al quedar este bajo el medio granular, es decir, no expuesto directamente al medio.



Figura 43. Fijación de material en zona sin sistema de drenaje. (Fuente propia)



Figura 44. Fijación de material en zona con sistema de drenaje. (Fuente propia)



Figura 45. Imagen de comparación del humedal antes/ después. (Fuente propia)



Figura 46. Registro del humedal fecha: 25/03/2019. (Fuente propia)

Conclusiones.

Mediante la implementación del sistema de drenaje, se concluye que este cumple con la finalidad de evacuación de las aguas lluvias hacia el interior del humedal impidiendo la acumulación de agua en el lugar.

Si bien el agua drena bajo las tuberías, cuando la cantidad de agua que llega al lugar es significativa y perjudicial para el humedal el dren juega un papel primordial en la conducción de las aguas trabajando en un 100% en base a su área disponible para la escorrentía limitando el nivel de agua acumulada a 7 cm.

El tipo de fijación utilizado no perjudica en nada el funcionamiento del humedal y no produjo contaminación del subsuelo, dado que esta zona no entra en contacto con las aguas servidas. Para realizar este tipo de anclaje solo se debe tomar en consideración dejar al menos 20 cm de membrana libre sobre el nivel estimativo de funcionamiento del humedal para tener una libre variación del nivel de agua en caso de ser necesario.

Este tipo de fijación afecta positivamente el manejo de las aguas, ya que, las aguas de escorrentía tienen dos vías de disposición, una el humedal y otra el suelo natural, minimizando de este modo los sobre caudales.

Se logró también la protección del drenaje y una mayor estabilidad del mismo, logrando mejorar la estética del borde del humedal, lo cual junto a una cubierta vegetal en el talud permitiría la continuidad de un manto verde quedando esta obra ingenieril implícita en el medio siendo más amigable a la percepción de la comunidad.

Referencias.

20.998, L. N. (2017). *Regula los servicios sanitarios*. Valparaíso.

Delgadillo, O. (2010). *Depuración de Aguas Residuales por medio de Humedales*. Cochabamba: Nelson Antequera Durán.

Dirección General de Aguas. (s.f.). Obtenido de Red Hidrométrica: <http://www.arcgis.com>

Elías Rosales. (s.f.). *Especialista en Ingeniería Sanitaria del Instituto de Hidráulica y Ambiental de Delft, Holanda*. Obtenido de <http://cfia.or.cr>

García, J., & Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos*. Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya.

HDPE, G. (s.f.). *Instalación*. Obtenido de <http://www.geosai.com/geomembrana-hdpe/>

INE. (2010).

José Pastor, M. C. (2017). *Manual de Ensayos de laboratorio de Mecánica del suelo*.

Minvu. (s.f.). *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias. Capítulo 3*. Obtenido de Marco Geográfico: www.minvu.cl

MOP. (s.f.). *Chile*. Obtenido de <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>

SISS. (2016). *Informe de Gestión del Sector Sanitario*. Santiago.