

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“ENFRENTANDO LA CRISIS HIDRICA MEDIANTE LA
VALORIZACION Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
CON HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA COMUNIDADES
RURALES DE LA REGIÓN DE ÑUBLE, CHILE”**

MARIO ENRIQUE GUTIÉRREZ MATAMALA

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

Chillán-Chile

2021

**ENFRENTANDO LA CRISIS HIDRICA MEDIANTE LA VALORIZACION Y
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES
CONSTRUIDOS PARA COMUNIDADES RURALES DE LA REGIÓN DE
ÑUBLE, CHILE**

Aprobado por:

Mónica Montory González
Bioquímica, Dra.
Profesor Asistente

Profesor Guía

Javier Ferrer Valenzuela
Ingeniero Civil Químico, Dr.
Profesor Asistente

Profesor Asesor

Francisco Encina Montoya
Biólogo Marino, Dr.
Profesor Asociado

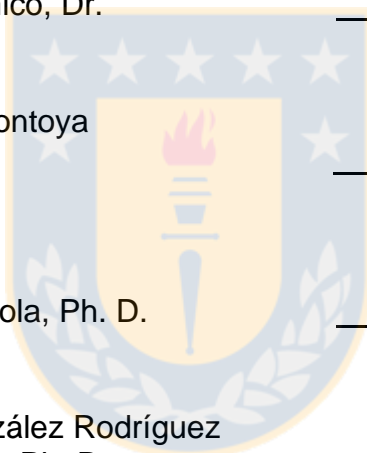
Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Asistente

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Asociado

Decana



ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. HIPÓTESIS	14
3. OBJETIVOS	14
3.1 Objetivo general.....	14
3.2 Objetivo específico.....	14
4. METODOLOGÍA.....	15
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
5.1 Sistemas de Pretratamiento.....	29
5.2 Desinfección de las aguas residuales	32
5.3 Plantas	37
5.4 Dimencionamiento Humedal construido subsuperficial Horizontal	40
6. CONCLUSIONES.....	46
7. LITERATURA CITADA.....	47
8. ANEXOS	52
Anexo 1: Formulas empleadas en la investigación	52
Anexo 2: Criterios	55

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto		Página
Tabla 1.	Sistemas de tratamiento convencionales (STC), no convencionales (STNC), en relación con sus veneficios y contras.....	11
Tabla 2.	Clasificación de los tipos de humedales construidos	12
Tabla 3.	Ventajas y desventajas de los distintos tipos de humedales construidos	18
Tabla 4.	Porcentajes de remoción para los dos tipos de humedales construidos seleccionados	20
Tabla 5.	Aspectos generales para los dos tipos de humedales construidos seleccionados.....	21
Tabla 6.	Porcentaje de agua entregada mediante camiones aljibes para los distritos que componen la comuna de Ninhue.....	25
Tabla 7.	Total de agua por persona (L m-2 día-1) para cada distrito de la comuna de Ninhue.....	25
Tabla 8.	Porcentajes de remoción para los distintos sistemas de pretratamiento.....	30
Tabla 9.	Aspectos generales de los sistemas de Pretratamiento.....	31
Tabla 10.	Ventajas y desventajas para los distintos sistemas de desinfección de aguas residuales.....	33
Tabla 11.	Costos y características del agua residual que afecta a los sistemas de desinfección.....	35
Tabla 12.	Características generales de macrófitas emergentes encontradas en la comuna de Ninhue.....	38
Tabla 13.	Criterios de diseño para la construcción de Humedal de flujo subsuperficial Horizontal.....	40
Tabla 14.	Resultados de dimensionamiento y costos para la construcción de Humedal de flujo subsuperficial Horizontal.....	41
Tabla 15.	Concentraciones máximas de Químicos en agua para riego.....	43
En el anexo		Página
Tabla 16.	Lista humedales construidos.....	56

Tabla 17.	Lista de criterios para elección de humedal construido.....	56
Tabla 18.	Resultado de importancia del humedal construido a seleccionar.....	57
Tabla 19.	Lista pretratamientos.....	57
Tabla 20.	Lista de criterios para la elección de pretratamiento.....	58
Tabla 21.	Resultado de importancia del pretratamiento a seleccionar.....	58
Tabla 22.	Lista sistemas de desinfección.....	59
Tabla 23.	Lista de criterios para la elección de sistema de desinfección.....	59
Tabla 24.	Resultado de importancia de sistema de desinfección a seleccionar.....	60



ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema metodológico.....	15
Figura 2. Precipitación acumulada (mm) en función del tiempo(año), para la comuna de Ninhue.....	23
Figura 3. Distribución de agua para cada distrito de la comuna de Ninhue.....	24
Figura 4. Pendiente para los distritos de la comuna de Ninhue.....	27
Figura 5. Ubicación del lugar para la construcción de un humedal construido.....	28
Figura 6. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales domiciliarias.....	37
Figura 7. <i>Juncos Inflexus</i>	39
Figura 8. <i>Cyperus alternifolius</i>	39
Figura 9. Diagrama conceptual del sistema de tratamiento completo, incluyendo los tamaños estimados de los sistemas de pretratamiento, Humedal y estanque de acumulación.....	44

ÍNDICE DE ECUACIONES

En el anexo	Página
Ecuación 1. Factor de corrección de la temperatura	52
Ecuación 2. Diseño Biológico, Enfoque P-K-C*	52
Ecuación 3. Carga orgánica superficial (COS)	53
Ecuación 4. Carga orgánica Transversal (COT)	53
Ecuación 5. Tiempo retención Hidráulico (TRH).....	53
Ecuación 6. Evapotranspiración diaria (ETo).....	54



**ENFRENTANDO LA CRISIS HIDRICA MEDIANTE LA VALORIZACION Y
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES
CONSTRUIDOS PARA COMUNIDADES RURALES DE LA REGIÓN DE
ÑUBLE, CHILE**

FACING THE WATER CRISIS THROUGH THE VALUATION AND
TREATMENT OF WASTERWATER WITH WETLANDS CONSTRUCTED
FOR RURAL COMMUNITIES IN THE REGION OF ÑUBLE, CHILE

Palabras claves: Sistemas de tratamiento, Sistemas de desinfección, Déficit hídrico

RESUMEN

En los últimos años producto del cambio climático, los periodos de temperaturas extremas y déficit de precipitaciones se han visto reflejadas en las principales cuencas del mundo. En Chile, la zona central vive una de las sequias más extensas desde que hay registro en el país, siendo categorizada como “megasequia”, si esta situación se mantiene, para el año 2040 dejaría a Chile dentro de los 30 países con mayor estrés hídrico del mundo. Debido a lo anterior es que se estudiara la comuna de Ninhue, perteneciente al secano interior, con altos índices de ruralidad y déficit en el tratamiento de aguas. Por lo que el objetivo de este estudio se centró en evaluar el tratamiento de aguas residuales, mediante humedales construidos para las zonas rurales de la región de Ñuble. Realizando un análisis de los distintos tipos de humedales

que se puedan adaptar a la comuna, una búsqueda bibliográfica en las principales páginas web científicas, como también estimaciones de área superficial en relación con la población atendida por camiones aljibes, acomodándose a un distrito por sus características topográficas y por la necesidad de reutilización dentro de este, incluyendo también sistemas de pretratamiento (desbaste y desarenador). Los resultados que se obtuvieron fue el humedal construido de flujo subsuperficial, el que se acomoda más a la realidad de la comuna. En conjunto de un tratamiento primario (fosa séptica) y un sistema de desinfección (CPC), logrando así un sistema de tratamiento completo, acomodándose a la realidad climática, topográfica y social de las zonas rurales de la región de Ñuble. Se concluye que el agua teóricamente cumple con la calidad necesaria para riego. Como recomendación, si se quiere construir un humedal de forma física, es necesario hacer pruebas de laboratorio o escala piloto, para obtener valores más precisos

FACING THE WATER CRISIS THROUGH THE VALUATION AND
TREATMENT OF WASTERWATER WITH WETLANDS CONSTRUCTED
FOR RURAL COMMUNITIES IN THE REGION OF ÑUBLE, CHILE

Keywords: Treatment systems, Disinfection systems, Deficit hydrique

SUMMARY

In recent years as a result of climate change, periods of extreme temperatures and rainfall deficits have been reflected in the main basins of the world. In Chile, the central zone is experiencing one of the most extensive droughts since there is a record in the country, being categorized as a “mega-drought”, if this situation continues, by the year 2040 it would leave Chile among the 30 countries with the highest water stress of the world. Due to the above, the commune of Ninhue, belonging to the interior dry land, with high rates of rurality and deficit in water treatment, was studied. Therefore, the objective of this study focused on evaluating wastewater treatment, through constructed wetlands for rural areas of the Ñuble region. Carrying out an analysis of the different types of wetlands that can be adapted to the commune, a bibliographic search in the main scientific web pages, as well as estimates of surface area in relation to the population served by tanker trucks, accommodating a district by its characteristics topographic and the need for reuse within it, also including pre-treatment systems (roughing and desander). The results obtained were the constructed subsurface flow wetland, the one that best accommodates the reality of the commune. Together with a primary treatment (septic tank) and a disinfection system (CPC), thus achieving a complete treatment system,

adapting to the climatic, topographic and social reality of the rural areas of the Ñuble region. It is concluded that the water theoretically meets the necessary quality for irrigation. As a recommendation, if you want to build a wetland in a physical way, it is necessary to carry out laboratory tests or pilot scale, to obtain more precise values



1. INTRODUCCIÓN

En el último tiempo ha aumentado el interés por “cambio climático”, el cual afecta al ciclo hidrológico, trayendo consigo problemas a nivel global, como cambios meteorológicos, fenómenos de temperaturas extremas y problemas de déficit hídrico, afectando incluso a las potencias económicas, países emergentes y a algunos de los más propensos a este cambio, los países pobres (ONU,2019).

El crecimiento de la población mundial ha aumentado la demanda de agua en 1% anual durante las últimas 5 décadas (UNESCO,2019), además incrementando la generación de residuos sólidos y líquidos, que se vierten directamente al suelo, contaminando las fuentes de agua dulce (Santibáñez, 2018). Por otro lado, la población vierte sus aguas residuales domésticas, de las cuales fluye el 80% a los ecosistemas sin ningún tipo de tratamiento o reutilización (Mateo-Sagasta,2017), intensificando la escasez hídrica para el abastecimiento humano (Törey,2018).

También es importante mencionar que, de la mano del crecimiento poblacional, viene la disponibilidad de alimento, indispensable para la población, provocando el crecimiento económico de la industria Agrícola, la cual en su actividad productiva consume alrededor del 70% del agua disponible. Para el año 2050 este crecimiento se puede tornar insostenible (Santibáñez, 2018)

Mientras gran parte de la industria se preocupa del agua como un recurso consumible para la agricultura, o industria, muchas veces se deja de lado una importante variable que es el suministro y el saneamiento de este recurso para las comunidades a nivel mundial, el cual es fundamental para la calidad de vida, estimándose que tres de cada diez individuos no tienen acceso a agua potable, y menos a un saneamiento de ésta (UNESCO,2019). En el caso de América latina el agua fresca disponible corresponde al 16 % del total global, mientras que el porcentaje de población corresponde un 9 % (Torras, 2017).

Respecto al saneamiento, en América Latina la situación no es alentadora, siendo alguno de los países menos desarrollados los que tienen mayores complicaciones como Nicaragua, El salvador, Panamá, Bolivia y Haití, donde el 25% de su población no dispone de saneamiento (Mateo-Sagasta,2017). Por otro lado, los países con un mayor porcentaje de la población conectada a alcantarillado, lo preside Chile con un 88% (valor estimado para el año 2011), luego están Colombia y México con 75% (valor estimado para el año 2012), y los países con menor porcentaje se encuentra Paraguay con un 10% (valor estimado para el año 2013) y en último lugar para Haití con un muy bajo 1% (valor estimado para el año 2012) (Mateo-Sagasta,2017). Luego de lo descrito anteriormente de la realidad a nivel mundial y latinoamericano, iremos a lo que está enfrentando Chile actualmente.

Chile

Al analizar la realidad local, en relación con la disponibilidad del recurso agua ya que está cuenta con 1.251 ríos, aproximadamente 15.000 lagos y lagunas, además, existe un cordón montañoso que provee de agua en la época de primavera - verano a ríos de régimen nival (Törey,2018), sin embargo, debido a la distribución de los recursos hídricos no es homogénea en todo el territorio, chileno. Mientras que la zona norte es representada por un clima seco, la zona intermedia presenta un clima mediterráneo que favorece la disponibilidad de precipitaciones (Martínez, 2018). El déficit de precipitaciones en el territorio nacional desde el año 1940 al 2010, presenta un 30% menos para las zonas comprendidas entre el sur de la región de Coquimbo y el norte de la región del Biobío, siendo el evento de sequía más extenso el comenzado el año 2010 al 2015, y el cual aún está en desarrollo al cual se le ha denominado “megasequía” (CR2,2015).

Mientras que en Chile el uso del recurso hídrico para consumo humano como bebida y usos sanitarios corresponde a un 6% del total utilizado (Martínez, 2018).

El área de saneamiento en zonas urbanas logra un 99,98% de cobertura en el territorio operacional, entre alcantarillado y tratamiento de aguas recolectadas (SISS,2018). Mientras que para la zona rural este nivel es menor logrando solo un 12%, en población concentrada, atendiendo así aproximadamente solo a 136.932 habitantes (Donoso et al., 2015)

Frente a este escenario de ausencia de saneamiento para las zonas rurales, donde las soluciones para el tratamiento de las aguas servidas se tienen que ajustar a las características de las comunidades. Las cuales pueden distribuirse en asentamientos concentrados (>50 casas), disperso (2-10 casas), Mixto (combinación de los dos anteriores), diseminado (1 casa), de esta forma surge la inquietud de analizar una alternativa económica y fácil de operar. Además, evaluar si el agua tratada puede ser reutilizada para riego (Vidal & Araya, 2014). en una zona central donde la “megasequía” está azotado fuertemente (CR2,2015).

En Chile la región de Ñuble presenta características de la megasequía, lo cual ha impactado a esta región debido principalmente, a su población rural correspondiente al 30,6% del total de su población (FLACSO-CHILE,2018).

Cuenta con algunas comunas muy pobres como es la situación de Ninhue, la cual se ubica en el secano interior de la región, al norponiente de la capital regional que es Chillán, contando con una población de 5.213 habitantes, en la cual un 28.75% vive en la zona urbana y el otro 71.24 % en zona rural (INE, 2017). Ninhue está considerada dentro de las cinco comunas más pobres de la región (INE, 2017), y con un aumento significativo del índice de envejecimiento que en el año 2002 fue del 48,03% y para el año 2017 fue del 114,37%, considerándose población de riesgo (FLACSO-CHILE,2018).

En Ninhue los niveles de saneamiento se centran en la zona urbana logrado abordar un 71 % de la población (SISS, 2018), mientras que para las zonas rurales las aguas servidas están desprovistas de algún tipo de tratamiento

(PLADECO,2015). Estas son vertidos directamente a cursos de agua superficiales o subterráneos, produciendo riesgos para la salud de la población debido a algunas sustancias que se pueden encontrar en estas, tales como grasas o aceites, sólidos en suspensión, sustancias con requerimientos de oxígeno y algunos patógenos (Vidal & Araya, 2014). en mucho de los lugares de la comuna las personas mantienen pozos noria para abastecimiento de agua en sus hogares o para regadío, estos pozos pueden contaminarse con estas descargas (Municipalidad de Ninhue,2015).

Para muchas personas, estos pozos noria y vertientes se han secado, principalmente en verano impidiendo el uso de este elemento vital como el agua para sus labores diarias, lo anterior se debe principalmente a que al ubicarse en el secano interior de la región presenta un clima templado cálido que favorece las precipitaciones en invierno y estación seca durante el verano (Municipalidad de Ninhue,2015). De esta forma el abastecimiento de agua en camiones aljibes por parte de la municipalidad es fundamental para el bienestar local, por lo tanto, se debe proveer a los pobladores de agua potable, en el año 2013 un total de 2.940.000 L mientras que para el año 2020 esto aumentó prácticamente en un 1000% ya que solo el primer trimestre se entregó 10.278.000 L (Municipalidad de Ninhue,2015).

De esta forma la tensión dentro de las comunidades rurales de la comuna y de la región de Ñuble referentes a la disponibilidad de agua, ha ido en aumento, ya que existen conflictos por el acaparamiento de vertientes o pozos en los cuales hay una nula fiscalización, desfavoreciendo la calidad de vida de las

personas. Es por esto que se hace sumamente importante solucionar este problema. Para lo cual existen tecnologías que permiten el mejoramiento de la calidad de agua y por ende el rehusó de está, disminuyendo la escasez de este recurso.

En cuanto a las tecnologías convencionales más utilizadas para el tratamiento de aguas servidas se encuentran: lodos activados con un 61%, seguido de lagunas aireadas con un 19% y emisario submarino con un 11%. Los tratamientos no convencionales se representan en porcentajes que son mucho más bajos, biofiltros y lombrifiltros con apenas un 1% cada uno y para otros prácticamente un 0% (SISS,2018).

Mientras que para las zonas rurales de Chile las alternativas de tratamiento comúnmente empleadas se pueden observar Tabla 1. En el caso de la primera alternativa corresponde a un tratamiento del tipo primario, la cual puede ser utilizada en conjunto a otra tecnología, como los Humedales construidos (SUBDERE,2018).

Como se muestra Tabla 1 la mejor alternativa para los sectores rurales de esta comuna se presentan los humedales construidos (HC), debido a que su implementación principal está dada para asentamientos con una baja población (Vidal & Hormazábal, 2018). En el caso de las zonas rurales de la comuna de Ninhue, se podría mejorar la calidad ambiental del entorno, teniendo un lugar siempre verde (humedal construido) en lugares completamente secos en época de verano, un nicho para distintas especies de animales, con un mejoramiento paisajístico. El agua obtenida a la salida del

humedal puede ser una fuente de agua para riego (Vidal & Araya, 2014). En una zona donde en épocas de verano el recurso hídrico es escaso.

Estos Humedales construidos (HC) se pueden clasificar en materia vegetal predominante y características de su flujo hidráulico véase Tabla 2.

Tabla 1. Sistemas de tratamiento convencionales (STC), no convencionales (STNC), en relación con sus veneficios y contras.

Tipo de Tratamiento	Beneficios	Contras	Referencias
Fosa séptica (STC)	<ul style="list-style-type: none"> -Fácil instalación. -Nulo gasto energético. -Nulo impacto visual. -El más utilizado en pequeñas comunidades. 	<ul style="list-style-type: none"> -Riesgo de contaminación de aguas subterráneas. - Bajo rendimiento en reducción de carga orgánica. - Generación de malos olores. 	5,2
Lagunas aireadas mecánicamente (STC)	<ul style="list-style-type: none"> -Bajos costos de mantención y operación. -Proceso simple. -Fácil control de operación. -Eficiente remoción de patógenos. -Eficiente eliminación de: solidos suspendidos y DBO5. 	<ul style="list-style-type: none"> -Puede presentar problemas de olores. -Requiere aireación artificial. -Altos requerimientos de energía. -Para lugares con mayor población. -Requerimiento de gran espacio 	5,2
Lombrifiltro o "Sistema Tohá" (STNC).	<ul style="list-style-type: none"> -Se puede obtener compost el cual puede ser utilizado como fertilizante orgánico. -Bajos requerimientos energéticos. -Bajos costos de operación. -Población 3.000 hab. 	<ul style="list-style-type: none"> -Requiere una mayor superficie que sistemas convencionales. -En climas fríos la proliferación de lombrices puede ser afectada. -Malos olores 	1,3

Continuación tabla anterior

Humedales construidos (HC) (STNC).	<ul style="list-style-type: none"> -Gastos de operación y mantenimiento bajos. -Sirve como hábitat para la vida silvestre -Buena eficiencia de eliminación de materia orgánica y nitrógeno. -Bajo consumo energético. -Se utiliza principalmente en zonas rurales. -No se producen lodos. -Fácil operación y mantención. 	<ul style="list-style-type: none"> -Sensible a cambios bruscos de carga orgánica. -Requiere entre 20 y 80 veces más superficie que las convencionales. -Necesita realizar tratamiento primario. -Su rendimiento puede ser variado. -Larga puesta en marcha. 	4
--	---	--	---

Referencias:[1] Salas (2007);[2] Töreý (2018);[3]García(2008);[4]López et al.(1998); [5]Vidal & Araya(2014).

Tabla 2. Clasificación de los tipos de humedales construidos.

Clasificación por materia vegetal	Clasificación por tipo de flujo hidráulico
Humedales construidos basados en macrófitas flotantes.	Humedales construidos con flujo superficial (FS).
Humedales construidos basados en macrófitas de hojas flotantes.	Humedales construidos con flujo Horizontal Subsuperficial (HFSS).
Humedales construidos basados en macrófitas sumergidas.	Humedales construidos de flujo vertical subsuperficial (VFSS)
Humedales construidos basados en macrófitas emergentes.	

Debido a lo expuesto anteriormente, frente al complejo escenario hídrico que se está viviendo en el mundo y en especial en Chile, la reutilización de las aguas residuales surge como una alternativa necesaria para combatir la crisis hídrica.

Es por esto por lo que se pretende evaluar el tratamiento de las aguas residuales mediante humedales construidos para zonas rurales de la región, así reutilizar las aguas tratadas para regadío. En lugares donde el recurso hídrico es muy limitado incluso para el abastecimiento humano, de esta forma se fomentarían nuevas fuentes de trabajo, se mejoraría la calidad de vida de las personas, como también una ayuda al medio ambiente.



2. HIPÓTESIS

La implementación de humedales construidos puede ser utilizado como sistema de tratamiento para aguas residuales en zonas rurales de la región de Ñuble, el cual entrega un agua con características para riego agrícola

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar el tratamiento de las aguas residuales, mediante humedales construidos para las zonas rurales de la región de Ñuble

3.2 Objetivos específicos

- Identificar qué tipo de humedal construido se adapta mejor a las características de las zonas rurales de la comuna de Ninhue.
- Analizar las mejores alternativas de pre y postratamiento para el humedal construido seleccionado con la finalidad que el agua resultante quede con calidad para riego.

4. METODOLOGÍA

Para dar respuesta a la metodología se realizó un esquema (Figura 1) simplificado el cual resume las distintas etapas a realizar, el cual se presenta continuación:

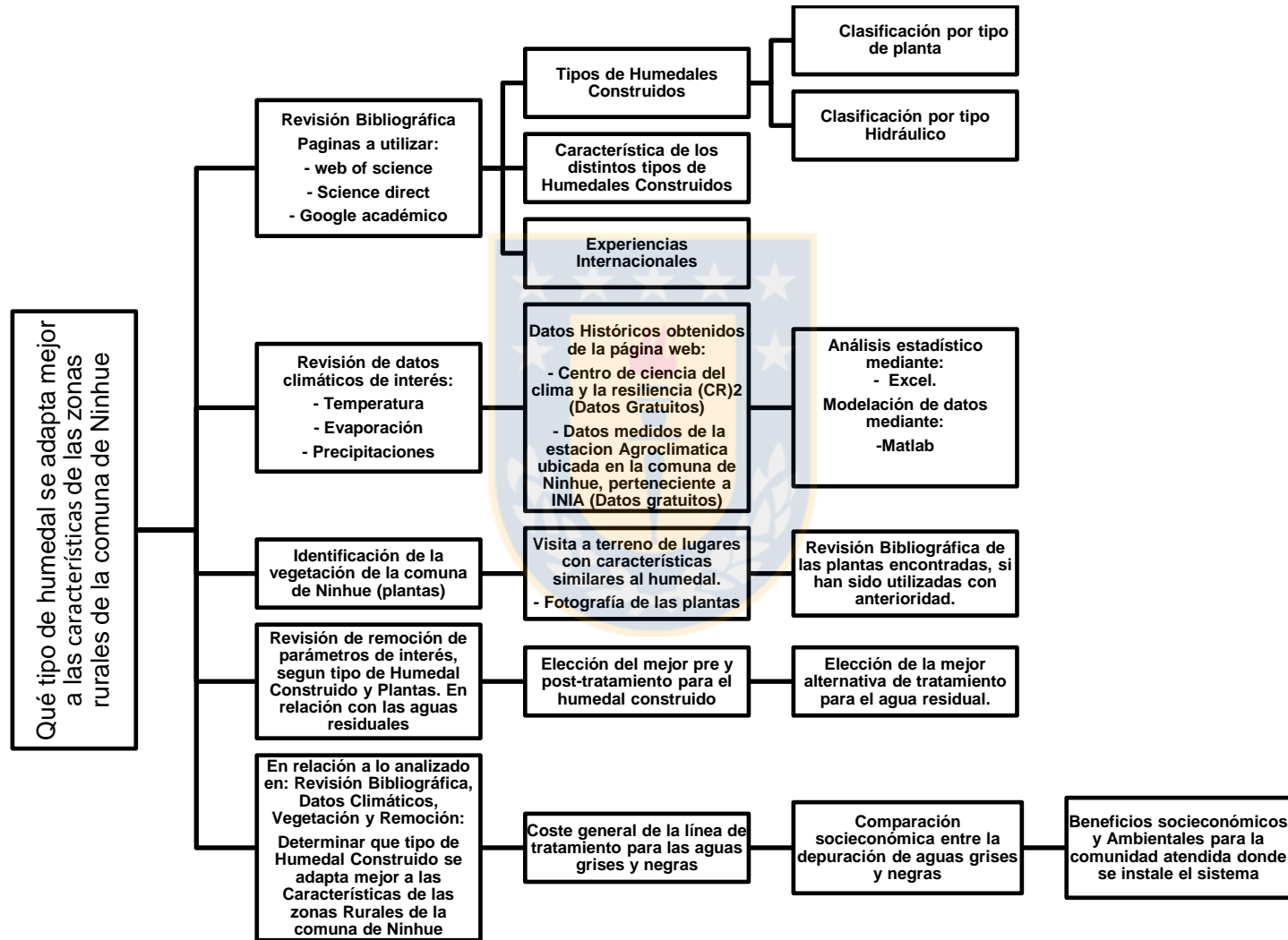


Figura 1. Esquema metodológico.

Se selecciono la comuna de Ninhue para la evolución técnico-económica a escala conceptual para el diseño y construcción futura de un Humedal construido, en base a la información que se recopilará de está, como variables meteorológicas, topografía y distribución poblacional de los distritos censales se analizará que tipo de Humedal Construido se adapta mejor a las condiciones de este lugar.

La metodología para la obtención de los datos antes mencionados se hará, mediante revisión de datos históricos de sitios web (CR2) y de la estación agrometeorológica ubicada en la comuna, como también datos entregados por el personal de la Municipalidad de Ninhue, y también la elaboración de mapas con el programa ArcGIS.

Para determinar que humedal construido se adapta mejor a las características de la comuna se realizará en base a un método analítico, donde se relacionará los antes mencionado con una revisión Bibliográfica de distintos autores a Nivel nacional como internacional, en páginas como, web of science, science direct y Google académico. Centrados principalmente en los tipos de humedales construidos, abordando sus características, de diseño y construcción, Vegetación utilizada, los pre y post tratamientos.

Como también de los beneficios ambientales y socioeconómicos para la población atendida, principalmente la de zonas rurales con problemas de déficit hídrico dentro de la comuna.

En el esquema metodológico queda representada la metodología, vista en la Figura 1.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los tres humedales construidos más comunes, correspondientes a Superficial o de Flujo Libre (FS), Subsuperficial Horizontal (FSH) y Subsuperficial Vertical (FSV).

Las ventajas y desventajas asociadas a cada tipo de humedal quedan expuestas en la Tabla 3, destacándose que el Humedal construido de flujo libre, en el último tiempo ha disminuido su implementación, debido principalmente por malos olores, atracción de vectores de enfermedades como mosquitos o moscas, esto porque el agua residual se encuentra en contacto con el ambiente. Por otra parte, requiere de una gran superficie para su implementación, esto por su disminución en la remoción de nutrientes y otros parámetros en temporada fría (EPA,2000).

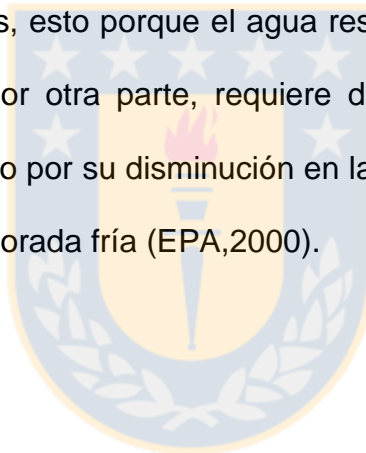
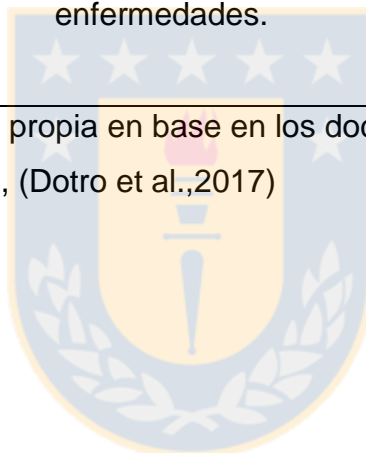


Tabla 3. Ventajas y desventajas de los distintos tipos de humedales construidos.

Tipo de Humedal	Ventajas	Desventajas
Flujo libre (FS)	<ul style="list-style-type: none"> - No se necesita de equipos mecánicos para su operación, lo cual hace que el mantenimiento y su monitoreo no sea por un personal calificado - Son menos costosos que los sistemas de FSH. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere de una gran área para su operación. - Sistemas donde el agua residual es en contacto directo con el ambiente. - La reducción en el contenido de coliformes fecales, no cumple con la norma chilena - Problemas con vectores de enfermedades - Problema de malos olores.
Subsuperficial Horizontal (FSH)	<ul style="list-style-type: none"> - No se requiere de un gran costo de construcción, operación y mantención. - No es necesario el monitoreo por personal calificado. - Estos sistemas no producen biosólidos, y son muy efectivos en la remoción de DBO, DQO y TSS. - No hay problema en vectores de enfermedades como mosquitos o moscas. - Son atractivos visualmente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren un área extensa para su operación. - En climas fríos baja la remoción de DBO, NH3 y NO3. - La reducción en el contenido de coliformes fecales, no cumple con la norma chilena

Subsuperficial Vertical (FSV)	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere una menor superficie a diferencia de los sistemas de flujo libre y FSH - Debido a que es un sistema más oxigenado logra una buena remoción de DBO, DQO, TSS y Nitrógeno amoniacal. - Este sistema al igual que el de FSH, no tiene problemas con vectores de enfermedades. 	<ul style="list-style-type: none"> - El gasto de operación es más elevado, debido a que se requiere el uso de equipos mecánicos (Ej: Bomba de agua) - Se requiere de personal capacitado para la operación y mantención del sistema. - Al igual que en los sistemas antes mencionados se requiere una desinfección post-tratamiento para la eliminación completa de virus y bacterias.
-------------------------------	--	---

Fuente: Elaboración propia en base en los documentos (EPA,1993), (EPA,2000), (Dotro et al.,2017)



Debido a lo anterior que se decidió trabajar y hacer la comparación solo con los dos tipos de humedales construidos restantes el de flujo Subsuperficial horizontal (FSH) y Subsuperficial vertical (FSV). Asociado a la remoción de algunos parámetros importantes dentro del tratamiento de aguas residuales, cumpliendo un rol fundamental a la hora de decidir por uno de estos humedales construidos, véase la Tabla 4.

Tabla 4. Porcentajes de remoción para los dos tipos de humedales construidos seleccionados.

Parámetro de remoción	Tipo de Humedal	
	FSH	FSV
DBO	70-80%	70-90%
DQO	>90%	>95%
TSS	70-85%	80-95%
TN	30-60%	20-30%
TP	10-25%	10-20%
NH ₃ -N	20-30%	30-45%
Otros	>50%NH ₄ -N	>60%NH ₄ -N

Fuente: Elaboración propia en base artículos de (Parde et al.,2021), (Casas et al.,2017), (Deister & Dias,2020), (Stottmeister et al.,2003)

Por otro lado, como se pretende realizar la instalación de alguno de estos dos sistemas en un área rural, se deben analizar otros aspectos importantes, que van desde el área a utilizar y sus costos, realizándose una comparación de estos puntos. Esto ayudara a determinar el tipo de humedal con el que se trabajara, véase la Tabla 5.

Tabla 5. Aspectos generales para los dos tipos de humedales construidos seleccionados.

Parámetro de remoción	Tipo de Humedal	
	FSH	FSV
Tiempo residencia (día)	2-10	1-5
Superficie (m ² pe)	3-10	1,5-5
Costo construcción	344,615	410,850
Costo (€ PE) mantención (€/PE día)	26,481	36,18
Lugares de uso (País)	Turquía España Dinamarca Polonia Grecia USA Brasil	Polonia Turquía Ucrania China Dinamarca

Fuente: Elaboración propia en base artículos de (Crites et al.,2006), (Deister & Dias,2020), (Casas et al.,2017), (Kedlec & Wallace,2009)

Luego de haber realizado una comparación entre los dos tipos de humedales construidos seleccionados y criterios expuestos en Anexo 2, se pudo determinar que para este estudio se trabajara con el tipo de humedal de flujo subsuperficial horizontal.

Debido a que los dos humedales presentan similares porcentajes de remoción, es por esto, que se centró en la parte económica y funcional. Ya que el lugar donde se pretende instalar este sistema presenta características de ruralidad, lo que va de la mano con un bajo nivel económico y educacional. Por lo tanto el humedal elegido se acomoda a estas características, ya que es más

económico en la mantención, en la puesta en marcha, además al no tener un requerimiento de bombas en su funcionamiento, no se necesita acceso cercano a electricidad, lo que facilitaría aún más la elección de lugar, acomodándose así a zonas rurales. Y como último punto a favor, el no requerimiento de un personal técnico calificado se acomoda a estas zonas donde la población es más adulta y con un bajo nivel de profesionales calificado.

Con el humedal ya seleccionado, se hará una revisión de las características propias de la comuna de Ninhue, donde se pretende instalar este sistema, analizando sus aspectos climáticos y topográficos, los cuales proporcionarían la mejor ubicación para la implementación de este tipo de tecnología.

La Figura 1, muestra la disminución de las precipitaciones desde el año 1993 de cuando se comenzó el registro hasta el año 2020, con una media de precipitación anual acumulada de 825,13 mm. En el primer periodo hasta el año 2009 se observaron fluctuaciones en los registros, en los cuales se superaba o se mantenía por debajo de la media, pero luego de superado ese año hasta la actualidad, los datos se han mantenido bajo este umbral, esto muestra el problema que hay en la comuna con relación a la baja en las precipitaciones. Al tener estas condiciones, las precipitaciones no sería un factor influyente en el humedal seleccionado.

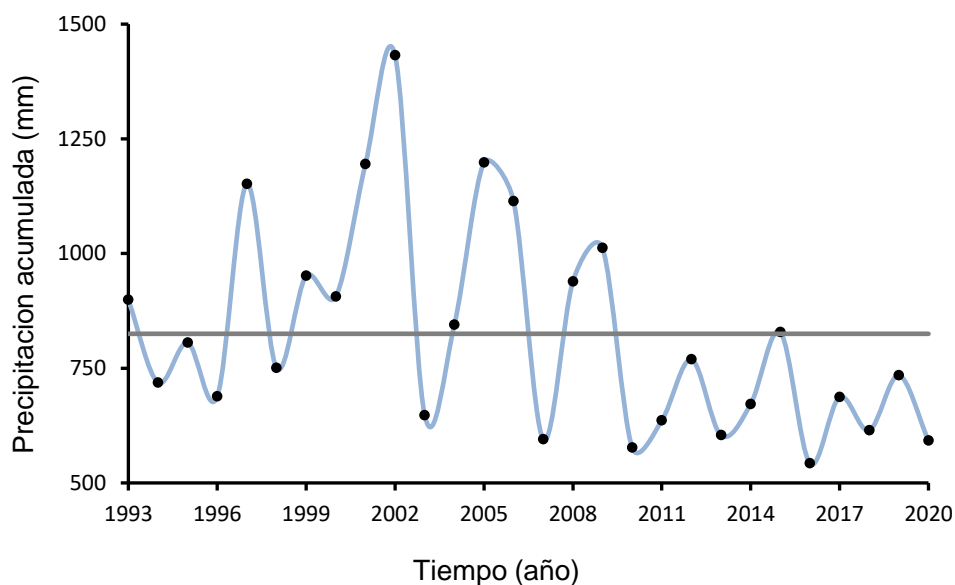


Figura 2. Precipitación acumulada (mm) en función del tiempo(año), para la comuna de Ninhue.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de DGA y Agrometeorología INIA.

La comuna al pertenecer al secano interior una de las zonas más afectadas por la sequía en este último tiempo (CR2,2015). Como se mostró en la Figura 2 la disminución en la acumulación de las precipitaciones es fundamental la reutilización de la poca agua disponible que hay durante todo el año, ya que esta se utiliza principalmente para las necesidades primarias. Es por lo que la implementación de los sistemas de Humedales construidos para estas zonas favorecería al bienestar de la población

Debido a lo señalado anteriormente, en la comuna para estos últimos años se comenzó a distribuir agua en camiones aljibes por parte de la Municipalidad, otorgándosele aproximadamente a un 50% de la población total Figura 2

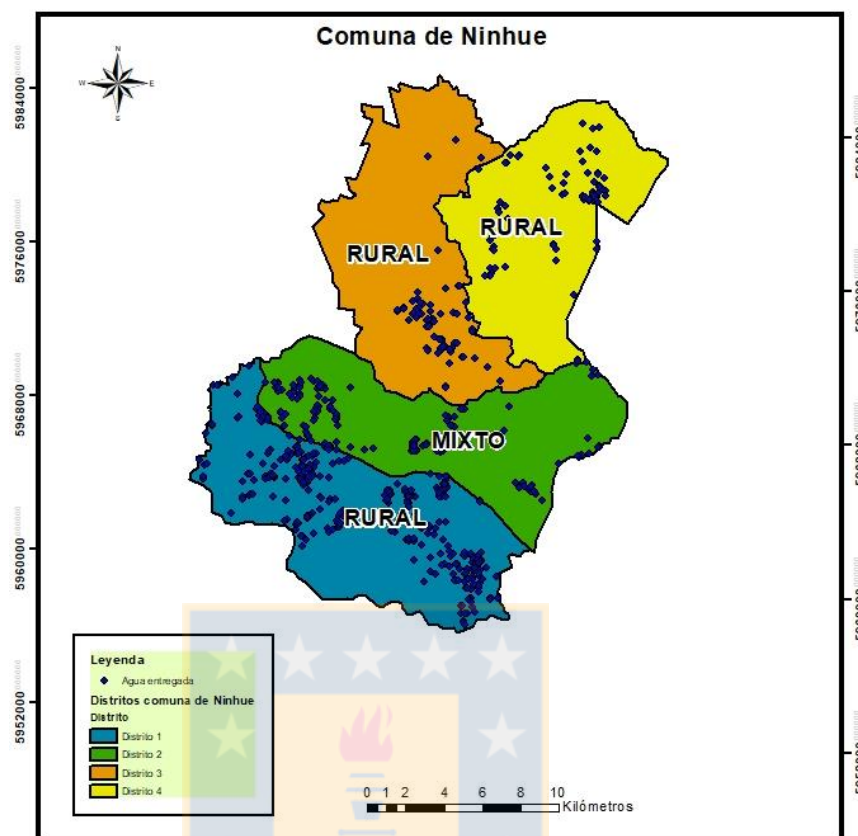


Figura 3. Distribución de agua para cada distrito de la comuna de Ninhue
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 6 y Figura 3, el Distrito 4 es donde se hace una mayor entrega de agua, pero tiene una menor población, es por esto que se realizó una serie de cálculos para determinar la disponibilidad de agua por día que hay para cada persona, en cada uno de los distritos, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 6. Porcentaje de agua entregada mediante camiones aljibes para los distritos que componen la comuna de Ninhue.

Población	Distrito 1 (Rural)	Distrito 2 (Mixto)	Distrito 3 (Rural)	Distrito 4 (Rural)
Rural	1949	1032	465	268
Total	1949	2499	465	268
Atendida	1196	812	235	249
% de Agua Entregada	61,4	78,7-32,5	50,5	92,9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Total de agua por persona ($L m^{-2} día^{-1}$) para cada distrito de la comuna de Ninhue.

	Distrito 1 (Rural)	Distrito 2 (Mixto)	Distrito 3 (Rural)	Distrito 4 (Rural)
Agua entregada año (m^3)	21827	14819	4288,75	4544,25
Precipitación acumulada año (m^3)	89784320,4	76679795	85435077,2	73064219,4
Total, de agua persona año (m^3)	46078	74316,4	183740,5	272644,6

Fuente: Elaboración propia.

De las Tablas 6 y 7 se obtiene que el Distrito 1 y 3, son los que cuentan con una menor disponibilidad de agua por persona, la diferencia es que la población es mucho mayor para el primero, generando una mayor necesidad, es por esto se seguirá trabajando con el Distrito 1.

En relación con otro punto importante que es la topografía, la cual cumple un rol para la construcción de los humedales, donde lo ideal se tengan terrenos con pendientes ligeramente suaves cercanos a los 3 grados, esto principalmente para evitar la escorrentía superficial y por otro ayuda a que las aguas residuales puedan moverse por diferencia de cota.

En la Figura 4 se muestran las pendientes de los cuatro distritos, pero al tener ya seleccionado con el que se pretende trabajar, se hará una revisión para la elección del mejor lugar dentro de este dónde se tengan las características topográficas antes mencionadas y una población de personas cercanas.

Es de esta forma es que en la Figura 5 se muestra la ubicación donde se instalaría el humedal construido, ya que este cumple con las características antes mencionadas, y además una cercanía a la carretera, lo que facilitaría la entrega de materiales.

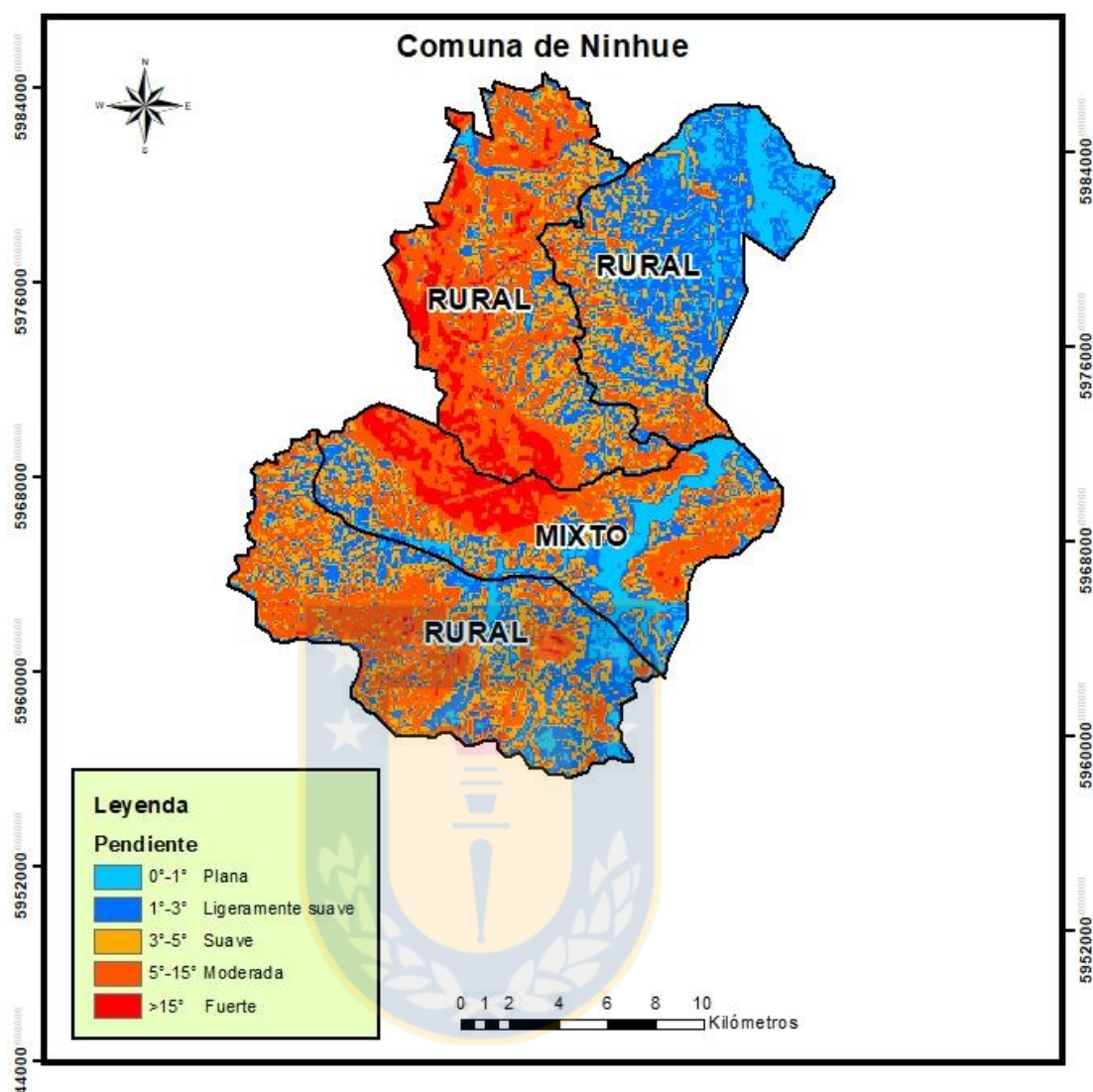


Figura 4. Pendiente para los distritos de la comuna de Ninhue.

Fuente: Elaboración propia.

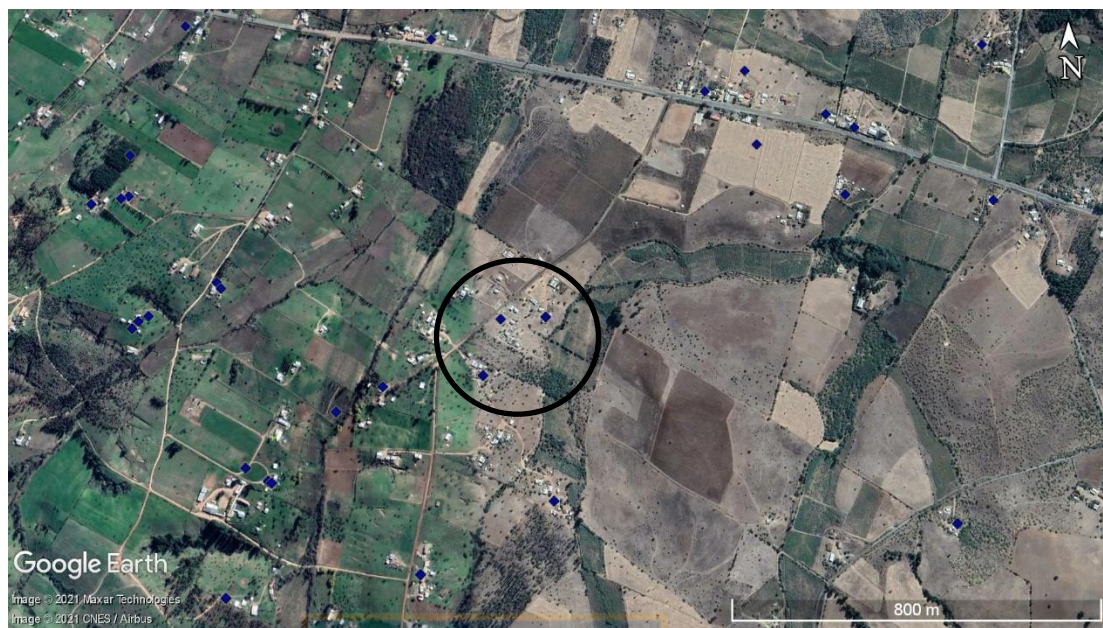


Figura 5. Ubicación del lugar para la construcción de un humedal construido.



5.1 Sistemas de pretratamiento

Como se ha mencionado anteriormente las pequeñas comunidades sobre todo las de zonas rurales, hacen que la construcción y manejo de plantas de tratamiento sea más complicado que en las zonas urbanas, por lo que las soluciones que se adopten para estas zonas deben priorizar en ser simples en su operación, de bajos costes de puesta en marcha y mantención, como también la baja automatización debido a la falta de personal calificado en las zonas donde se pretende instalar.

Actualmente en Chile, la cobertura de tratamiento de aguas residuales para las zonas rurales es bajo o en algunas zonas prácticamente nula (SISS,2018), observándose que la solución más utilizada para este problema es la fosa séptica, debido a su bajo costo, pero esta no cumple con las características de un sistema de tratamiento para que se una solución completa, sólo se le considera un pretratamiento, de esta forma este sistema debe ir acompañado de otra solución, que en el caso de este trabajo es el humedal construido.

En la Tabla 8, se muestra una comparación de los porcentajes de remoción entre la fosa sépticas y otras tecnologías utilizadas como pretratamiento como son, tanque Imhoff y reactor anaeróbico con deflactores (ABR), de esta forma entregando una idea más completa de cómo es el comportamiento de estas estas tecnologías usadas en el pretratamiento de aguas residuales y como estos pueden ayudar a mejorar el rendimiento del humedal construido

seleccionado, para que se tenga un mejor rendimiento de este, incluso bajando sus costos operacionales al disminuir el área utilizada.

Tabla 8. Porcentajes de remoción para los distintos sistemas de pretratamiento

Parámetros	Fosa séptica	Tanque Imhoff	Reactor anaeróbico con deflectores (ABR)
DBO ₅ (%)	20-40	25-35	50-60
DQO (%)	20-30	25-50	10-45
SST (%)	50-70	50-70	25-50
Reducción de lodos (%) Otros	40	90	90
TRH (d)	1-2	0,1-0,2	1-3

Fuente: Elaboración propia en base artículos de (Vidal & Araya,2014), (Tilley et al.,2018)

Los porcentajes de remoción para cada sistema de pretratamiento, y como estos tienen una similitud entre sus valores, y solo existen algunas diferencias, las cuales no son tan alejadas entre los distintos sistemas, donde la reducción de DBO₅ es mejor para los sistemas Tanque Imhoff y ABR, al igual que la reducción de lodos que se puede obtener hasta un 90%. Mientras que para el caso de la fosa séptica el parámetro que mejor tiene resultados en su reducción es el de SST.

Los antecedentes permiten seleccionar el sistema utilizado como pretratamiento, pero aún no es concluyente, de esta forma en la Tabla 9 se pueden observar algunos criterios como la cantidad de personas que pueden ser atendidas con el sistema, para la elección del pretratamiento a utilizar

Tabla 9. Aspectos generales de los sistemas de Pretratamiento.

Parámetros	Fosa séptica	Tanque Imhoff	Reactor anaeróbico con deflectores (ABR)
Máximo P	350	5000	5000
Caudal (m ³ d ⁻¹)	< 6	6-40	30-40
Dimensiones (m ²)	4A>L>2A	15-30	10-40
Costos (CI Hab)	35.000-50.000	150.000-300.000	50.000-150.000

Fuente: Elaboración propia en base artículos de (Vidal & Araya,2014), (Tilley et al.,2018)

De la Tabla 9 se obtienen algunas generalidades para la elección del sistema de pretratamiento a utilizar, entre ellos es Las fosas sépticas si bien la cantidad de personas es menor que los otros dos sistemas restantes, pero su ventaja es que este es el más utilizado como tratamiento en el área rural, por lo tanto ya estaría incluido en la mayoría de los hogares de esta forma sería más siempre su implementación y como punto importante dentro de la elección de un sistema de pretratamiento es su operación y mantención que en general es más simple para el sistema antes mencionado, finalizando con su costos que son más bajos que los otros dos sistemas, tanque Imhoff y reactor (ABR).

El análisis de los criterios descritos en las Tablas 8 y 9, y lo expuesto en Anexo 2, se determina que el sistema de pretratamiento a utilizar en conjunto con el humedal construido será la fosa séptica esto debido principalmente a que tiene

una buena reducción de lodos lo cual sería beneficioso esto debido a que la eliminación de estos no sería frecuente bajando los costos de operación, además los costos por persona no son tan elevados como se mencionó anteriormente y la mantención de este sistema podría ser llevada a cabo por un apersona de la misma localidad con una previa capacitación.

5.2 Desinfección de las aguas residuales

Debido a que las aguas residuales dentro de sus componentes un parte importante es la presencia de microorganismos bacterias, virus, helmintos, etc, los cuales pueden causar enfermedades a los humanos o contaminar el cultivo que se pretenda regar con el agua reutilizada.

Por lo tanto, la eliminación/inactivación de estos microorganismos, puede ser realizado por el sistema de humedal construido, pero no en su totalidad, ya que se logra alrededor de 90-99% de inactivación (Vidal & Araya,2014), adicionalmente se debería incorporar la desinfección como medida de inactivación de los microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales, y así evitar enfermedades como hepatitis, fiebre tifoidea entre otras. Hoy en día existe una serie de métodos de desinfección para las aguas residuales, que van desde agente químicos como Cloro y Ozono, y agentes físicos como es la radiación UV. En la Tabla 10 se presenta lagunas ventajas y desventajas de estos sistemas, dejando así una claridad en el funcionamiento de cada uno de estos y su comportamiento con las aguas residuales.

Tabla 10. Ventajas y desventajas para los distintos sistemas de desinfección de aguas residuales.

Sistema de desinfección	Ventajas	Desventajas
Cloro	<p>Sistema más utilizado en desinfección a pequeña escala en el mundo</p> <p>Sistema más rentable que la desinfección por ozono y UV</p> <p>La persistencia del cloro residual puede prolongar el proceso de desinfección</p> <p>El cloro es eficaz contra una amplia serie de patógenos</p> <p>Control fácil en la dosificación y operación</p> <p>Efectivo en la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos, eliminando malos olores.</p>	<p>El cloro residual es toxico por lo tanto requiere de un declarador</p> <p>Se requiere de mucho cuidado en el proceso de manejo, transporte y almacenamiento debido a que el cloro es corrosivo y toxico</p> <p>El cloro residual es inestable en presencia de altas concentraciones de DBO, por lo tanto, requeriría una mayor concentración</p> <p>EL cloro puede reaccionar con compuesto orgánicos crenados compuestos peligrosos</p>
UV	<p>Eficaz contra la desactivación de virus, bacterias y esporas.</p> <p>Al ser un proceso físico no tiene problemas con el transporte, almacenamiento y manejo de sustancias químicas, toxicas, peligrosas o corrosivas.</p> <p>No existen residuos, por lo tanto, no afecta organismos acuáticos o humanos.</p> <p>Operación del sistema siempre</p>	<p>En bajas dosificaciones de radiación no es muy eficaz contra, virus bacterias y esporas.</p> <p>Algunos organismos pueden realizar medidas de adaptación invirtiendo los efectos destructivos de la radiación UV</p> <p>En presencia de SST en altas concentraciones y</p>

Ozono	<p>Mejor rendimiento contra la eliminación de virus y bacterias en comparación al sistema de cloración.</p> <p>Periodos cortos de contacto con el agua residual</p> <p>No genera residuos peligrosos, problemas mínimos en el transporte y puesta en marcha de este sistema</p>	<p>Estos sistemas requieren de un personal más calificado para su operación y mantención, ya que son más complejos que los sistemas de cloro y UV</p> <p>No es un sistema económico, sobre todo cuando se tiene altas concentraciones de DBO y SS.</p> <p>Es más caro en la inversión para su puesta en marcha y gasto eléctrico.</p> <p>Es altamente corrosivo por lo que se requiere elementos como acero inoxidable.</p>
-------	---	---

Fuente: Elaboración propia. En base artículos de (EPA,1999), (EPA, 2003), (Solsana & Méndez,2002)

Debido a lo señalado anteriormente se decidió seguir trabajando en una comparación de algunos aspectos generales solo para dos sistemas de desinfección, cloro y UV, debido principalmente a que, en las desventajas del sistema de ozono, se tiene dos puntos negativos muy influyentes para el sector donde se pretende instalar el sistema no se acomodarían. Primero el ser un sistema tan complejo, requiere de un personal calificado para su operación y mantención lo cual no se encontraron en un área rural, por lo que se tendrá que contratar aumentando así los costos, lo que nos lleva al segundo punto que es lo caro para su puesta en marcha, además de un gasto energético constante asociado, lo cual generaría un problema para los locatarios.

Siendo elegidos los sistemas antes mencionados, esto debido a que entre sus ventajas y desventajas se encuentran similitudes por lo que no se podría dar una elección solo con esta información entregada, es por esto que la Tabla 11, entregara una mayor información de puntos claves en los procesos de desinfección.

Tabla 11. Costos y características del agua residual que afecta a los sistemas de desinfección

	Cloro	UV
DBO ₅	- Dependerá de los grupos funcionales y estructuras que estén contenidas en el agua residual	- Habiendo una gran cantidad esto puede afectar al traspaso de la radiación UV
SST	- Aísla y protege las bacterias que presentan demanda de cloro	- Absorbe la radiación y protege las bacterias disminuyendo la calidad de la desinfección
Nitrito	- Reduce la efectividad del cloro	- Efectos menores
Durezas	- Efectos menores	- Afecta la solubilidad de los metales
Otros		
Costos (dólar)	- 100,000-200,000	- 50,000-200,000

Fuente: Elaboración propia. En base artículos de (EPA,1999), (EPA, 2003), (Solsana & Méndez,2002)

Ya sea cualquiera de los dos sistemas de desinfección a utilizar en el área rural es sumamente importante que este se opere de forma correcta, como también los procesos de mantenimiento adecuados, ya que esto determinara la desinfección y el tiempo de utilidad del sistema.

Para el caso de desinfección con cloro la no buena mantención o utilización del sistema puede crear subproductos, los cuales pueden afectar de forma negativa la desinfección.

Debido a lo señalado anteriormente y lo expuesto en las Tablas 10 y 11, y lo expuesto en el Anexo 2, se decidirá trabajar con el sistema de desinfección UV, debido a los bajos costes operativos lo cual se acomoda a las necesidades del área rural, la no utilización de energía eléctrica lo cual facilitaría aun más las opciones de donde ubicar el sistema, y como último punto su baja complejidad en su operación, de esta forma cualquier persona de la misma localidad puede quedar a cargo con su previa capacitación.

Luego de ya tener claras todas nuestras operaciones unitarias es importante agregar un sistema que está antes del pretratamiento, el que tendrá como finalidad la eliminación de sólidos grandes y arenas. El cual consiste en un canal de desbaste con dimensiones para que también funcione de desarenador, cumpliendo con el objetivo principal el cual es la eliminación de sólidos gruesos que puedan venir en el agua residual, debido a que el ingreso de estos al sistema puede afectar su funcionamiento, y al tener las dimensiones para un desarenador esto ayuda que estas partículas de alta densidad sean sedimentadas y eliminadas, de esta forma no afectando todo el sistema que prosigue.

Con todo lo señalado anteriormente en la Figura 5 se expone el diagrama de flujo de nuestro sistema de tratamiento para las aguas residuales con reutilización para riego.

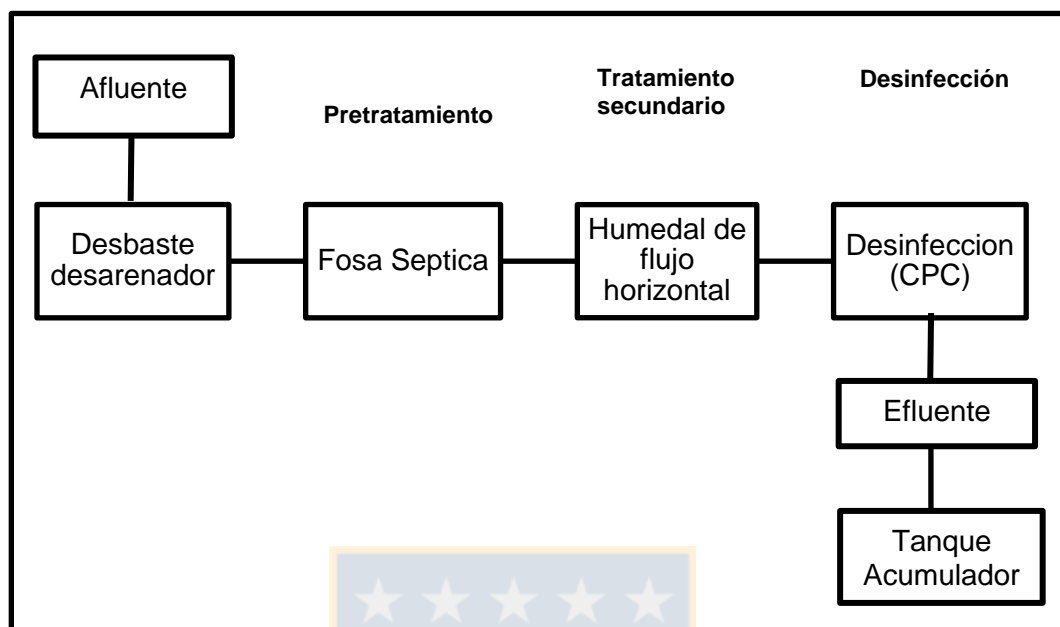


Figura 6. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales domiciliarias.

Fuente: Elaboración propia

5.3 Plantas

Como se ha mencionado, el tipo de vegetación es importante en la construcción de un humedal, esto principalmente debido a que las macrófitas cumplen un rol fundamental, desde la capacidad de generar biopelículas microbianas, asociadas a las raíces, siendo las responsables de la degradación de la materia orgánica contenida en el agua residual, sumándole la filtración y absorción. Todo esto con la capacidad de transferencia de oxígeno a la columna de agua que está en la parte inferior, limitando el crecimiento de las algas (Vidal & Hormazábal, 2018).

Es por esto que se realizó una visita en terreno de los sectores y lugares húmedos semejantes a un humedal, ubicados en la comuna de Ninhue, de

esta forma las plantas encontradas estarías adaptadas al clima de la comuna y no se tendría que pasar por un proceso de aclimatación.

Encontrándose así dos tipos de estas macrófitas emergentes, *juncos Inflexus* y *Cyperus alternifolius*, de las cuales las principales diferencias se pueden encontrar en la Tabla 12

Tabla 12. Características generales de macrófitas emergentes encontradas en la comuna de Ninhue.

Remoción	<i>juncos Inflexus</i>	<i>Cyperus alternifolius</i>
DBO5 (%)	70-80	60-70
DQO (%)	75-80	55-75
TSS (%)	52-65	30-40
TN (%)	46-55	32-40
OD variación (%)	30-35	23-28
Atura (cm)	80-120	120-150
Raíz (cm)	30-40	20-30

Fuente: Elaboración propia en base artículos de (Leto et al.,2013), (Vidal & Hormazábal,2018)

Luego de lo expuesto en la Tabla 12 y ver las diferencias en los porcentajes de remoción de cada una de las plantas y un aspecto importante que es el crecimiento de las raíces. Se pudo observar que *juncos Inflexus* tiene mejor comportamiento en cada uno de los parámetros y su raíz es de una longitud mayor, es por esto que se decide esta planta a utilizar en el Humedal construido.



Figura 7. *Juncos Inflexus*
Fuente: Elaboración propia



Figura 8. *Cyperus alternifolius*
Fuente: Elaboración propia

5.4 Dimencionamiento Humedal construido subsuperficial horizontal

De acuerdo con los valores y criterios de diseño, esto en relación con las características antes mencionadas anteriormente de la comuna de Ninhue, y el lugar donde se ubicaría su futura construcción, se detalla en la Tabla 13, mientras que las fórmulas utilizadas para estos cálculos se exponen en el Anexo 1.

Tabla 13. Criterios de diseño para la construcción de Humedal de flujo subsuperficial Horizontal

Parámetro	Unidades	Valor
Diseño Biológico		
Carga hidráulica persona	(L P ⁻¹ d ⁻¹)	180
Concentración DBO ₅ descarga	(g P ⁻¹ d ⁻¹)	50
Número de personas	(P)	20
Temperatura media	(°C)	14,2
Carga másica	(gDBO ₅ d ⁻¹)	600
Q entrada	(m ³ d ⁻¹)	3,6
Concentración efluente	(gDBO ₅ m ⁻³)	166,7
Constante cinética	1 d ⁻¹	0,153
Concentración afluente	(g DBO ₅ m ⁻³)	15
Medio soporte	Grava	
Tamaño	mm	2500
Conductividad hidráulica	m ³ m ⁻² d ⁻¹	1000
Porosidad		0,35
Evapotranspiración	mm d ⁻¹	1,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Resultados de dimensionamiento y costos para la construcción de Humedal de flujo subsuperficial Horizontal

Resultados		
Área Total	(m ²)	152
Largo	(m)	21
Ancho	(m)	7
Profundidad Agua	(m)	0,6
Volumen	(m ³)	91
TRH	(d)	9
HLR	(mm d ⁻¹)	24
COS	(gDBO ₅ m ⁻² d ⁻¹)	4
COT	(gDBO ₅ m ⁻² d ⁻¹)	141
Área/persona	(m ² P ⁻¹)	8
Costos		
Construcción	Millones	6.299.727
Mantención	Millones	1.935.902

Fuente: Elaboración propia

Con lo señalado en la Tabla 14, no considerando la evapotranspiración por no ser tan significativa ya que diariamente se tendrían alrededor de 240 L evapotranspiración, no siendo significativos para la construcción del humedal. Se observa los resultados del dimensionamiento de un Humedal Construido Subsuperficial, para una población de 20 personas, lo cual dio como resultado un área y una relación largo /ancho que se puede acomodar al sector seleccionado, ya que se contaría con el terreno para la disposición de todo el sistema, incluyendo el pre y postratamiento. Además esta estimación se

realizó con un consumo de agua más alto del común de las personas del sector, esto en función a lo indicado en la cantidad de litros persona día, esto debido a si se quieren agregar más personas al mismo humedal y no se tengan que hacer modificaciones, o por la población flotante en épocas estivales, tanto de fiestas costumbristas dentro de la comuna o de las celebraciones a nivel nacional, la cual hace llegar familiares de otras ciudades, de esta forma el humedal construido tendría la capacidad de solventarse durante ese periodo. Luego en los costos de construcción no arrojó costos tan elevados, lo cual se acomoda a la realidad de estas comunidades, y así poder implementarse ya sea con subsidios por parte la municipalidad, o por dineros gubernamentales asociados a un proyecto para la comunidad.

Por lo tanto, en la Tabla 15, se muestra los parámetros que debe contener el afluente para cumplir con la Norma de calidad de agua para riego.

Al igual que en la Figura 9, se mostrará el diagrama para el sistema de tratamiento completo de las aguas residuales domiciliarias que haría, un efluente reutilizable con calidad de riego.

Teniendo en consideración que para la Figura 9, no se consideraron las dimensiones del sistema de desinfección CPC, debido a que para ser más rigurosos en su tamaño se debía realizar un análisis completo, con una mayor información de datos, y además ahondar en la construcción de este.

El enfoque principal de este estudio es el dimensionamiento del humedal construido, centrando el mayor tiempo en la búsqueda y análisis de resultado de este objetivo. Los demás valores indicados en la Figura 9, correspondientes

a los sistemas de pretratamiento están asociados principalmente a tamaños estándares que se presentan dentro del mercado

Tabla 15. Concentraciones máximas de Químicos en agua para riego.

Elemento		Unidad	Límite máximo
Aluminio	(Al)	mg/l	5
Arsénico	(As)	mg/l	0,1
Bario	(Ba)	mg/l	4
Berilio	(Be)	mg/l	0,1
Boro	(B)	mg/l	0,75
Cadmio	(Cd)	mg/l	0,01
Cianuro	(CN-)	mg/l	0,2
Cloruro	(Cl-)	mg/l	200
Cobalto	(Co)	mg/l	0,05
Cobre	(Cu)	mg/l	0,2
Cromo	(Cr)	mg/l	0,1
Fluoruro	(F-)	mg/l	1
Hierro	(Fe)	mg/l	5
Litio	(Li)	mg/l	2,5
Litio (cítricos)	(Li)	mg/l	0,075
Manganeso	(Mn)	mg/l	0,2
Mercurio	(Hg)	mg/l	0,001
Molibdeno	(Mo)	mg/l	0,01
Níquel	(Ni)	mg/l	0,2
Plata	(Ag)	mg/l	0,2
Plomo	(Pb)	mg/l	5
Selenio	(Se)	mg/l	0,02
Sodio porcentual	(Na)	%	35
Sulfato	(So4 =)	mg/l	250
Vanadio	(V)	mg/l	0,1
Zinc	(Zn)	mg/l	2

Fuente: Elaboración propia en base a NCh 1.333. Requisitos de calidad para diferentes usos.

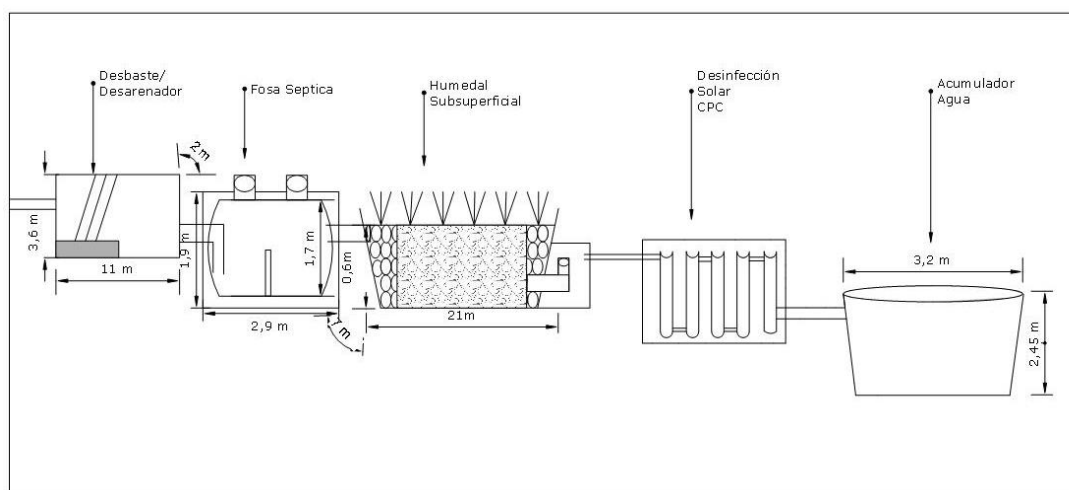


Figura 9. Diagrama conceptual del sistema de tratamiento completo, incluyendo los tamaños estimados de los sistemas de pretratamiento, Humedal y estanque de acumulación.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 15, se muestra las características del agua para que tenga calidad de riego, se realiza el diagrama expuesto en Figura 9, donde se tendría el sistema de tratamiento de aguas residuales, con el cual se obtendría como resultado un efluente de aguas residuales domesticas con calidad para gua de riego.

Esto ayudado con los procesos de remoción de contaminantes, y la eliminación de metales por procesos fisicoquímicos, de la mano con los procesos de absorción y traslocación de metales realizados por las plantas en su proceso de Fito extracción (Soda et al.,2012). Sumándole además el proceso de desinfección por el que sería sometida el agua residual, esto ayudaría en la eliminación de patógenos presentes.

Y una de las alternativas que se podría realizar, es hacer un sistema hibrido

de plantas dentro del humedal, esto debido principalmente a que *Juncos inflexus* como se describió anteriormente tiene una buena eliminación de patógenos, pero *Cyperus alternifolius* tiene una mejor eliminación de metales pesados, los cuales son los elementos que necesitan una menor cantidad en el agua para que tenga calidad de riego, de esta forma se cumpliría con el objetivo de forma teórica.

Cabe mencionar que antes de la construcción de un humedal es necesario las pruebas de laboratorio, que demuestren y ratifiquen de forma practica la eliminación y cumplimiento de la norma, ya que en este estudio solo se realizó de forma teórica todo el sistema de tratamiento y el cumplimiento de la NCh 1333.



6. CONCLUSIONES

Luego de haber realizado una descripción de las características climáticas, topográficas y de población de la comuna de Ninhue, dio como resultado que el humedal que mejor se adapta a estas condiciones es el de flujo subsuperficial, esto debido a sus características operativas que son de fácil mantención y operación, acomodándose al área rural donde se pretende implementar, y su costo, en general es más bajo que el de los otros sistemas. El análisis de los distintos sistemas de pretratamiento dio como resultado por costos, porcentajes de remoción y operación, el sistema de fosa séptica, esto incluyendo previamente un sistema de desbaste y desarenador.

Para el proceso de postratamiento se escogió el colector cilíndrico parabólico compuesto (CPC), por los bajos costos y la nula necesidad de incluir maquinaria externa al sistema, ya que solo se utiliza la luz UV del sol.

Al conocer todo el sistema de tratamiento, se obtiene de forma teórica un agua residual con calidad para riego, pero como se menciona en los resultados del estudio, para una construcción efectiva, es necesario realizar pruebas de laboratorio donde se generen resultados más exactos.

7. LITERATURA CITADA

1. Casas, Y., A. Rivas D. López and G. Vidal. 2017. Life-cycle greenhouse gas emissions assessment and extended exergy accounting of a horizontal-flow constructed wetland for municipal wastewater treatment: A case study in Chile. *Ecol. Indicators* 74: 130-139.
2. Crites, R.W., J. Middlebrooks and S.C. Reed. 2006. *Natural wastewater treatment systems*. (2nd. ed.). Taylor & Francis Group. Boca Raton, USA.
3. CR2. 2015. *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Informe a la Nación* [en línea]. Centro de Ciencia del el Clima y la Resiliencia (CR)2, Chile. <<https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>>. [Consulta: 10 julio 2020].
4. Deister, F. and E. Dias 2020. Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review. *Environ. Res.* 190 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110016> [en línea].
5. Donoso, G., C. Calderón y M. Silva. 2015. *Informe final de evaluación. Infraestructura hidráulica de agua potable rural (APR)* [en línea]. Dirección de Presupuestos, Chile. <http://www.dipres.gob.cl/595/articles-141243_informe_final.pdf>. [Consulta: 10 julio 2020].
6. Dotro, G., G. Langergraber, P. Molle, J. Nivala, J. Poigagut, O. Stein and M. Von Sperling. 2017. *Treatment wetlands. Biological wastewater treatment series. Volumen 7*. IWA Publishing. Chennai, India.
7. EPA (USA). 1993. *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment a technology assessment*. United States Environmental Protection Agency. Washington D.C., USA.
8. EPA (USA). 1999. *U.S. census data on small community housing and wastewater disposal and plumbing practices*. United States Environmental Protection Agency. Washington D.C., USA.

9. EPA (USA). 2000. Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters. Manual. United States Environmental Protection Agency. Washington D.C., USA.
10. EPA (USA). 2003. Wastewater technology fact sheet. Disinfection for small systems [en línea]. United States Environmental Protection Agency, USA. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/disinfection_small.pdf>. [Consulta: 10 julio 2020].
11. FLACSO-Chile. 2018. Diagnóstico con información secundaria para el desarrollo territorial de la nueva Región de Ñuble. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. Santiago, Chile.
12. García, J. y A. Corzo. 2008. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
13. INE (Chile). 2018. Síntesis de resultados Censo 2017. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile.
14. Instituto Nacional de Normalización. 1978. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. NCh 1333: of. 78 modificada en 1987. Santiago, Chile.
15. Kadlec, R.H. and S.D. Wallace. 2009. Treatment wetlands. (2nd. ed.). Taylor & Francis Group. Boca Raton, USA.
16. Leto, C., T. Tuttolomondo, S. La Bella, R. Leone and M. Licata. 2013. Effects of plant species in a horizontal subsurface flow constructed wetland-phytoremediation of treated urban wastewater with *Cyperus alternifolius* L. and *Typha latifolia* L. in the west of Sicily (Italy). Ecol. Eng. 61(Part A): 282-291.
17. López, C., G. Concha, F. Asunción y C. Herce. 1998. Filtros verdes: una alternativa real en el tratamiento de aguas residuales en pequeños

- municipios [en línea]. Fundación Nueva Cultura del Agua, España. <<https://fnca.eu/biblioteca-del-agua/documentos/documentos/110.pdf>>. [Consulta: 10 julio 2020].
18. Martínez, M.L. 2018. Radiografía del agua: brecha y riesgo hídrico en Chile. Escenarios Hídricos 2030. Santiago, Chile.
 19. Mateo-Sagasta, M. 2017. Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe. Estado, principios y necesidades. FAO. Santiago, Chile.
 20. Municipalidad de Ninhue. 2015. Plan de desarrollo comunal de Ninhue 2015-2019. Informe final [en línea]. Municipalidad de Ninhue, Chile. <<https://www.munininhue.cl/transparencia/administracion/pladeco2015-2019.pdf>>. [Consulta: 10 julio 2020].
 21. ONU (USA). 2019. Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el cambio climático y el agua. Naciones Unidas. Washington D.C., USA.
 22. Parde, D., A. Patwa, A. Shukla, R. Vijay, D.J. Killedar and R. Kumar. 2021. A review of constructed wetland on type, treatment, and technology of wastewater. Environ. Technol. Innov. 21 <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261> [en línea].
 23. Salas, J.J., J.R. Pidre e I.C. Fernández. 2007. Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla. Sevilla, España.
 24. Santibáñez, F. 2018. El cambio climático y los recursos hídricos de Chile: Agricultura chilena, reflexiones y desafíos al 2030 [en línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Chile. <<https://www.odepa.gob.cl/wpcontent/uploads/2018/01/cambioClim12parte.pdf>>. [Consulta: 10 julio 2020].
 25. SISS (Chile). 2018. Informe de gestión del sector sanitario [en línea]. Superintendencia de Servicios Sanitarios, Chile. <https://www.siss.gob.cl/586/articles-17722_recurso_1.pdf>. [Consulta: 10 julio 2020].

26. Soda, S., T. Hamada, Y. Yamaoka, M. Ike, H. Nakazato, Y. Saeki, T. Kasamatsu and Y. Sakurai. 2012. Constructed wetlands for advanced treatment of wastewater with a complex matrix from a metal-processing plant: Bioconcentration and translocation factors of various metals in *Acorus gramineus* and *Cyperus alternifolius*. *Ecol. Eng.* 39: 63-70.
27. Solsana, F. y J.P. Méndez. 2002. Desinfección de aguas [en línea]. Ministerio de Salud, El Salvador. <http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/agua/GUIA_DESINFECCION.pdf>. [Consulta: 10 julio 2020].
28. Stottmeister, U., A. Wießner, P. Kusch, U. Kappelmeyer, M. Kästner, O. Bederski, R.A. Müller and H. Moormann. Torra. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnol. Adv.* 22(1-2): 93-117.
29. SUBDERE (Chile). 2018. Estudio de soluciones sanitarias para el sector rural. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. Santiago, Chile.
30. Tilley, E., C. Lüthi, A. Morel, Zurbrügg and R. Schertenleib, 2008. Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. Eawag. Water Supply & Sanitation. Dübendorf, Switzerland.
31. Törey, S. 2018. Claves para la gestión de aguas residuales rurales. Primera planta de reúso de aguas tratadas en la Región de Coquimbo, una experiencia replicable. Fundación Chile. Santiago, Chile.
32. Torras, L. 2017. El agua: el petróleo del Siglo XXI [en línea]. World Economic Forum. <<https://es.weforum.org/agenda/2017/09/el-agua-el-petroleo-del-siglo-xxi/>>. [Consulta: 17 julio 2020].
33. UNESCO (Francia). 2019. No dejar a nadie atrás: Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019 [en línea]. UNESCO, Francia. <<https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>>. [Consulta: 17 julio 2020].
34. Vidal, G. y F. Araya. 2014. Las aguas servidas y su depuración en zonas

rurales: situación actual y desafíos. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.

35. Vidal, G. y S. Hormazábal. 2018. Humedales construidos: diseño y operación. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.



8. ANEXOS

Anexo 1: Formulas empleadas en la investigación

Ecuación 1. Factor de corrección de la temperatura

$$Kt = K_{20} \theta^{(T-20)}$$

Donde:

Kt = coeficiente de reacción a temperatura del agua T

K_{20} = coeficiente de reacción a temperatura del agua a 20°C

T = temperatura del agua, $^{\circ}\text{C}$

θ = Factor de temperatura modificada de Arrhenius, adimensional

Ecuación 2. Diseño Biológico, Enfoque P-K-C*

$$A = \frac{P Qi}{Kt} \left(\left(\frac{Ci - C^*}{Co - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right)$$

Donde:

A = área Humedal, m^2

Co = concentración de salida o efluente, mg L^{-1}

Ci = concentración de entrada o afluente, mg L^{-1}

C^* = concentración de fondo, mg L^{-1}

Kt = coeficiente superficial de primer orden modificado, m d^{-1}

P = cantidad aparente de tanques en serie (TIS), adimensional

Qi = caudal de entrada, $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$

Ecuación 3. Carga orgánica superficial (COS)

$$COS = \frac{CM}{A}$$

Donde:

COS= Carga orgánica superficial, gDBO₅ m⁻² d⁻¹

CM= Carga Másica, gDBO₅ d⁻¹

A= área Humedal, m²

Ecuación 4. Carga orgánica Transversal (COT)

$$COT = \frac{CM}{Ac h}$$

Donde:

COT= Carga orgánica superficial, gDBO₅ m⁻² d⁻¹

CM= Carga másica, gDBO₅ d⁻¹

Ac = Ancho humedal, m

h= Profundidad humedal, m

Ecuación 5. Tiempo retención Hidráulico (TRH)

$$TRH = \frac{(\epsilon v)}{Qi}$$

Donde:

TRH= Tiempo de retención hidráulico, d

ε = Porosidad, 0,35

v=Volumen, m³

Qi = caudal de entrada, m³ d⁻¹

Para la revisión de los cálculos realizados en Excel, dirigirse al siguiente enlace

Ecuación 6. Evapotranspiración diaria (ET_o)

$$ET_o = 0,0023(T_{med} + 17,78) * R_o * (T_{max} - T_{min})^{0,5}$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración diaria (mm d^{-1})

T_{med} = Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$)

T_{max} = Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)

T_{min} = Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$)

R_o = Radiación solar (mm día)



Anexo 2: Criterios

Como se ha ido planteando en este trabajo, donde se pretende buscar la mejor solución de tratamiento de las aguas residuales de las comunas de la Región de Ñuble. Y la importancia en considerar factores presentes dentro de la región, como la pobreza y el nivel educacional, ya que el sistema a implementar debe acomodarse y adaptarse a estos factores.

Es por esto que se realizaron tablas comparativas para cada uno de los sistemas tratados en el estudio, humedales construidos, pretratamiento y sistemas de desinfección. Para cada uno de los sistemas se realizaron tablas independientes de criterios, incluyendo en estos dos factores importantes antes mencionados, como la pobreza que para la región de Ñuble se encuentra en la séptima posición de pobreza multidimensional con un 22,4% y en segundo lugar de pobreza con ingresos con un 20,6%, sumando además que la comuna con la cual se está trabajando tiene en estos dos índices de pobreza sobre un 30%, superando con creces el nivel nacional que es del 11,7% (FLACSO-Chile, 2018).

Para el caso de la educación en la comuna estos niveles están muy al debe bajo el nivel nacional, con un ingreso solo del 47% a nivel preescolar, 71% a educación media y solo un 11% a nivel superior, mientras que a nivel nacional son de 52%, 75% y 31% respectivamente, (FLACSO-Chile, 2018) debido a esto el sistema implementado no tiene que ser de una complejidad operacional ya que la población atendida no está familiarizada con sistemas complejos, sumándole además que el 18% de su población es adulta mayor, y esto sigue en aumento.

Criterios para el tipo de humedal construido

En base a lo mencionado anteriormente en el documento, a cada criterio expuesto en cada una de las tablas se le asigno una importancia que va desde:

Muy alta 4, Alta 3, Media 2 y Baja 1, estos niveles fueron asignados por el autor de este estudio para la facilidad de entendimiento.

Donde a mayor valor más importancia tendrá el criterio y será el elegido dependiendo del sistema que se esté analizando.

Elección de Humedal Construido en base análisis multicriterio

Tabla 16. Lista humedales construidos.

Sigla	Humedal construido
A1	FSH
A2	FSV

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Lista de criterios para elección de humedal construido.

Sigla	Criterio	Importancia
B1	Costos construcción	4
B2	Costos mantención	4
B3	Complejidad de operación	4
B4	% remoción	3

Continuación tabla anterior

B5	Disponibilidad de espacio	3
B6	Uso de energía externa	1
	Total	19

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Resultado de importancia del humedal construido a seleccionar.

Humedal construido	B1	B2	B3	B4	B5	B6	Total
Importancia	4	4	4	3	3	1	19
A1	4	4	3	3	2	1	17
A2	3	3	2	3	1	0	12

Fuente: Elaboración propia

Elección de pretratamiento en base análisis multicriterio

Tabla 19. Lista pretratamientos.

Sigla	Sistema de pretratamiento
C1	Fosa séptica
C2	Tanque Imhoff
C3	Reactor anaeróbico con deflectores (ABR)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Lista de criterios para elección de pretratamiento.

Sigla	Criterio	Importancia
D1	Costos	4
D2	Complejidad de operación y mantención	4
D3	% remoción	4
D4	Personas atendidas	3
D5	Volumen	3
D6	Disponibilidad de espacio	1
	Total	19

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Resultado de importancia del pretratamiento a seleccionar.

Pretratamiento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Total
Importancia	4	4	4	3	3	1	19
C1	4	4	3	2	2	1	16
C2	1	1	4	3	3	0	12
C3	2	2	4	3	3	0	14

Fuente: Elaboración propia

Elección de sistema de desinfección en base análisis multicriterio

Tabla 22. Lista sistema de desinfección.

Sigla	Sistema de desinfección
E1	Cloro
E2	UV
E3	Ozono

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Lista de criterios para elección de sistema de desinfección.

Sigla	Criterio	Importancia
F1	Costos	4
F2	Complejidad de operación	4
F3	Generación o manejo de elementos tóxicos	4
F4	Problemas en la eficiencia	3
F5	Uso de energía externa	3
F6	Disponibilidad de espacio	1
	Total	19

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Resultado de importancia de sistema de desinfección a seleccionar.

Desinfección	F1	F2	F3	F4	F5	F6	Total
Importancia	4	4	4	3	3	1	19
E1	3	3	4	2	0	0	12
E2	2	2	0	3	0	1	8
E3	4	4	3	0	2	0	13

Fuente: Elaboración propia

