

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**DISEÑO Y MODELACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE PARA VEGAS
MAGALLÁNICAS**

KARLA LORENA RODRÍGUEZ GALLEGUILLOS



PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO
A LA FACULTAD DE INGENIERÍA
AGRÍCOLA DE LA UNIVERSIDAD DE
CONCEPCIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERA CIVIL AGRÍCOLA

CHILLÁN-CHILE

2021

DISEÑO Y MODELACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE PARA VEGAS MAGALLÁNICAS

Aprobador por:

José Luis Arumi
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Profesor Guía

Jerónimo Paredes
Licenciado en Matemática, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Camilo Souto
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asistente

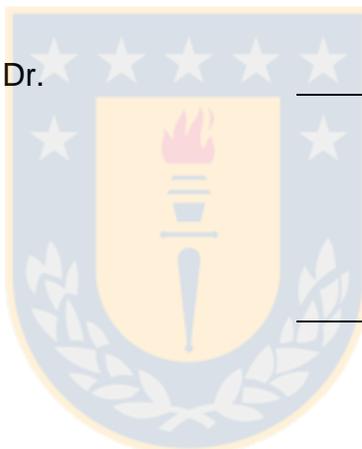
Profesor Asesor

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

Director de Departamento

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

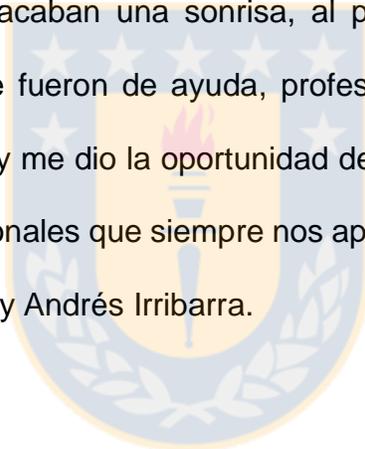
Decana



DEDIDACTORIA

Este proyecto de título está dedicado a mi familia, mi madre Doris, mi padre Oscar, mi hermana Valeria, mi hermano David y mi sobrina Leonor, que gracias a su apoyo pude llegar hasta este punto de mi vida. En especial a mi novio Héctor Garrido, que ha sido un pilar fundamental y siempre saca lo mejor de mi cada día.

También quiero dedicar esta memoria a mis profesores que me acompañaron durante mi formación académica, al profesor Jose Luis Arumi, que siempre sus anécdotas me sacaban una sonrisa, al profesor Jorge Jara que sus consejos siempre me fueron de ayuda, profesora Natalia Valderrama que siempre creyó en mí y me dio la oportunidad de acercarme a la docencia. A mis amigos incondicionales que siempre nos apoyamos mutuamente, Walter Araya, Carlos bustos y Andrés Irribarra.



AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos al profesor José Luis Arumí, por su incondicional apoyo, guía y comprensión durante mi etapa universitaria y memoria de título. A los profesores Jerónimo Paredes y Camilo Souto por su apoyo en la realización de la presente memoria de título. Además de agradecer a INIA Kampenaike en representación del profesor Jorge Ivelic por su guía y expertiz entregada acerca de las Vegas Magallánicas y finalmente, agradezco CRHIAM y al proyecto ANID/FONDAP/15130015 por ayudar en el financiamiento de este trabajo.



ÍNDICE DE MATERIAS

RESUMEN	1
SUMMARY	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS.....	6
2.1 Objetivo general.....	6
2.2 Objetivos específicos	6
3. MARCO TEÓRICO	7
3.1 Vegas magallánicas.....	7
3.2 Descripción área de estudio.....	10
3.3 Balance hídrico	13
3.4 Fluctuación nivel freático en la Vega de estudio	16
3.5 Características físico- hídricas del suelo	17
3.6 Sistemas de drenaje	20
4. METODOLOGÍA	23
4.1 Identificación área de estudio	23
4.2 Recarga Vega Magallánica	24
4.3 Modelo numérico	25
4.3.1 Ecuación de Hooghoudt	27
4.3.2 Ecuación de Ernst	32
4.4 Diseño hidráulico	36
4.4.1 Diseño de compuertas	39
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
5.1 Modelo Numérico.....	46
5.1.1 Ecuación de Hooghoudt	47
5.1.2 Ecuación de Ernst	50
5.1.3 Análisis de sensibilidad flujo radial	53
5.2 Funcionamiento del sistema de drenaje preexistente.....	54
5.3 Funcionamiento del sistema de drenaje con mejoras.....	58
5.3.1 Propuesta sistema de drenaje subterráneo	58

5.3.2 Propuesta sistema de drenaje superficial – subterráneo	59
5.3.3 Propuesta sistema de drenaje superficial	59
5.3.4 Compuertas verticales.....	60
6. CONCLUSIONES	65
7. LITERATURA CITADA.....	66
8. ANEXOS.....	67
8.1 Anexo A. Ecuaciones complementarias	67
8.2 Anexo B. Figuras complementarias de las modelaciones realizadas.	69



ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Resultado balance hídrico de Vega coironal en la estación experimental Kampenaike (mm mes^{-1}). Fuente: Ivelic-Sáez et al., 2021.....	15
Tabla 2.	Características del suelo promedio ubicada en la Vega coironal en la estación experimental Kampenaike. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.....	20
Tabla 3.	Balance hídrico de Vega coironal en la estación experimental Kampenaike, con precipitación (P), evapotranspiración (ET), recarga superficial (RS) en (mm mes^{-1}). Fuente: Ivelic-Sáez et al., 2021.	24
Tabla 4.	Diferencia entre nivel topográfico y nivel freático (D.F) para las sondas (S3, S6, S4 y S5). Fuente: Elaboración propia	54
Tabla 5.	Diferencia del nivel topográfico y nivel freático (D.F) y la profundidad del nivel freático mínimo recomendado (Z) para las sondas (S3, S6, S4 y S5). Fuente: Elaboración propia	55
Tabla 6.	Posición de la compuerta a lo largo del canal de drenaje principal (P), longitud entre el canal de drenaje principal al canal de drenaje más cercano (L). Fuente: Elaboración propia	61
Tabla 7.	Descripción de la etiqueta de medición de nivel hidráulico para el canal de drenaje principal. Fuente: Elaboración propia.....	62
Tabla 8.	Nivel hidráulico recomendado (y) para un rango de nivel freático recomendado de 0,6 hasta 0,8 m, longitud entre el canal de drenaje principal al canal de drenaje más cercano (L). Fuente: Elaboración propia.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Drenes ubicados en la Vega Magallánica de la estación experimental Kampenaiké. Fuente: Elaboración propia.	10
Figura 2.	Mapa ubicación del área de estudio, Vega Magallánica. Fuente: Elaboración propia.....	12
Figura 3.	Imagen satelital de la Vega en estudio, con las líneas amarillas indican la dirección principal del escurrimiento de agua. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.....	13
Figura 4.	Modelo conceptual del balance hídrico en la Vega de la estación experimental Kampenaiké. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.....	15
Figura 5.	Fluctuaciones mensuales del nivel freático (m.s.n.m) en la Vega magallánica de estudio. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.....	16
Figura 6.	Área de estudio, donde los puntos amarillos indican las ubicaciones de los sensores de nivel freático, el polígono rojo muestra la Vega estudiada y las flechas rojas la dirección de flujo de aguas subterráneas. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.....	17
Figura 7.	Ubicación calicatas (C3, C4 y C5) punto de muestreo (amarillo) y medición del nivel freático. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.....	18
Figura 8.	Contenido volumétrico de agua (%) en función del potencial matricio del suelo representado por pF como el log (Ψ) con potencial matricio (Ψ) en m.c.a. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.	18
Figura 9.	Diagrama de los diferentes aspectos a considerar para un sistema de drenaje agrícola. Fuente: Salgado 2000.	22
Figura 10.	Área de estudio, sensores de nivel freático (S3, S4, S5 y S6), calicatas (C3, C4 y C5), sistema de drenaje (líneas azules), delimitación del área de estudio (polígono rojo). Fuente: Elaboración propia.....	23

Figura 11.	Esquema de un sistema de drenaje agrícola superficial. Nivel freático (H), nivel hidráulico (D), diferencia entre el nivel freático e hidráulico (h), flujo de salida hacia el canal de drenaje (Q). Fuente: Elaboración propia en base a Salgado (2000)	26
Figura 12.	Perfil del movimiento de agua en el suelo, con flujo vertical y horizontal. Fuente: Elaboración propia en base a Salgado (2000)	27
Figura 13.	Descripción de los casos abordados por la ecuación de Hooghoudt. Fuente: Elaboración propia.....	
Figura 14.	Componente del flujo hacia los drenes, según la teoría de Ernst. Conductividad hidráulica del estrato superior (K_1), Conductividad hidráulica del estrato superior (K_2), distancia desde el nivel del agua en el punto medio entre los drenes al límite de las estratas (D_1), espesor de la estrata inferior (D_2), carga hidráulica (Δh) y estrato impermeable (E.I). Fuente: Elaboración propia en base a Salgado (2000)	29
Figura 15.	Drenes ubicados en una Vega Magallánica. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 16.	Sección estándar del canal de drenaje, con la altura total del canal (Y), revancha del canal (r), nivel hidráulico del canal (y). Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 17.	Caracterización del nivel freático recomendado (H), zona de desarrollo de raíces (z) y la altura total del canal (Y). Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 18.	Representación de la hidráulica de una compuerta vertical. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 19.	Área de estudio, canales del sistema de drenaje (líneas azules), longitud entre canales de drenaje (amarillo), delimitación del área de estudio (polígono rojo), sensores de nivel freático (S3, S4, S5 y S6) y calicatas (C3, C4 y C5). Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 20.	Variación del nivel hidráulico (y) para el perfil transversal del canal de drenaje en función de diferentes largos entre drenes (L). Fuente: Elaboración propia.....	48

Figura 21.	Nivel hidráulico (y) en función del nivel freático recomendado (H) para diferentes largos entre drenes(L). Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 22.	Variación del nivel hidráulico (y) para el perfil transversal del canal de drenaje en función de diferentes largos entre drenes(L). Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 23.	Nivel hidráulico (y) en función del nivel freático recomendado (H) para diferentes largos entre drenes(L). Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 24.	Comparación de la variación del nivel hidráulico (y) para el perfil transversal del canal de drenaje en función de diferentes largos entre drenes (L), con y sin componente radial. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 25.	Comparativa del nivel freático (N.F) en función de la longitud de la Vega Magallánica (L), para los meses de Julio (Máximo nivel freático) y Febrero (Mínimo nivel freático). Fuente: Elaboración propia.....	57
Figura 26.	Compuerta de control del nivel freático con un sistema electrónico y perfil de un dren francés. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 27.	Sistema de drenaje híbrido (superficial- subterráneo). Fuente: Elaboración propia en base a Salgado (2000).	59
Figura 28.	Ubicación de compuertas verticales (puntos celestes) en el canal de drenaje principal (línea amarilla), canales de drenaje secundarios (línea azul) y distancia entre drenes (línea verde). Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 29.	Representación del perfil transversal del canal de drenaje principal. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 30.	Representación del Perfil longitudinal del canal de drenaje principal. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 31.	Comparativa del nivel freático (N.F) en función de la longitud de la Vega Magallánica (L), para los meses de abril, mayo, junio y julio del año 2019. Fuente: Elaboración propia.....	69

Figura 32.	Comparativa del nivel freático (N.F) en función de la longitud de la Vega Magallánica (L), para los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre del año 2019. Fuente: Elaboración propia.....	70
Figura 33.	Comparativa del nivel freático (N.F) en función de la longitud de la Vega Magallánica (L), para los meses de diciembre del 2019, enero y febrero del año 2020. Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 34.	Comparativa del nivel freático (N.F) en función de la longitud de la Vega Magallánica (L), para los meses de abril, mayo y junio del año 2020. Fuente: Elaboración propia.....	72



DISEÑO Y MODELACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE PARA VEGAS MAGALLÁNICAS

DESIGN AND MODELING OF DRAINAGE SYSTEMS FOR VEGAS MAGALLÁNICAS

Palabras clave: drenaje agrícola, Vegas Magallánicas, humedales, sistemas de drenaje, aguas subterráneas.

RESUMEN

Las Vegas Magallánicas son ecosistemas formados durante los periodos de glaciación recientes que están conformados por suelos planos con gran contenido de materia orgánica y una alta capacidad de almacenamiento de agua. Las vegas aportar diferentes beneficios a la flora y fauna Magallánica y muchas de ellas fueron afectadas por la construcción de drenes, con fines de aumentar la superficie productiva. El mal diseño de estos drenes, ocasionó importantes deterioros en la estructura de los suelos de las vegas que se secaron. Para recuperar las vegas degradadas por la construcción de drenes, se propone una metodología para mejorar los sistemas de drenaje existentes, mediante la implementación de un sistema de compuertas para controlar el nivel freático en los drenes existentes. Este sistema se modeló con el software MATLAB, usando las ecuaciones de Hooghoudt y Ernst, para estudiar el comportamiento del drenaje. Se comparó la adaptabilidad del drenaje a las características propias de la Vega Magallánica, usando como caso de estudio una vega existente en la Estación Kampenaike del INIA. Los resultados mostraron que la ecuación de Ernst generó mejores estimaciones para caracterizar

el perfil de suelo y un rango mayor de adaptabilidad para analizar las propuestas de remediación a los sistemas de drenaje preexistentes.



DESIGN AND MODELING OF DRAINAGE SYSTEMS FOR VEGAS MAGALLÁNICAS

Keywords: agricultural drainage, Vegas Magallánicas, wetlands, drainage systems, groundwater.

SUMMARY

Las Vegas Magallanicas are ecosystems formed during the recent glaciation periods that are composed of flat soils with a high content of organic matter and a high-water storage capacity. The meadows provide different benefits to the Magellan flora and fauna and many of them were affected by the construction of drains, to increase the productive surface. The poor design of these drains caused significant deterioration in the structure of the soils of the plains that dried up. To recover the meadows degraded by the construction of drains, a methodology is proposed to improve the existing drainage systems, through the implementation of a gate system to control the water level in the existing drains. This system was modeled with MATLAB software, using the Hooghoudt and Ernst equations, to study drainage behavior. The adaptability of the drainage to the characteristics of the Vega Magallanicas was compared, using as a case study an existing meadow in the INIA Kampenaike Station. The results showed that the Ernst equation generated better estimates to characterize the soil profile and a greater range of adaptability to analyze the remediation proposals to the pre-existing drainage systems.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno que está afectando a diferentes sectores productivos tanto a nivel mundial como nacional, incluyendo la Región de Magallanes, sobre todo en el sector agrícola, ganadero y forestal. Fenómenos como el alza de las temperaturas, periodos climáticos inusuales, concentraciones de la precipitación, escasez de nieve, etc.; han tenido consecuencias directas sobre las condiciones hídricas, productivas y ecológicas, provocando la degradación de las praderas naturales y Vegas, aumento de la desertificación generando un efecto sobre la competitividad de los sectores anteriormente mencionados así mismo como la productividad de la región.

Los humedales actúan como grandes acumuladores y depósitos de agua, que cumplen una función fundamental para la conservación de la fauna nativa y la biodiversidad. En la Patagonia, los humedales asociados a depresiones o cauces, que permiten el crecimiento de praderas que son utilizadas para el forraje del ganado se denominan Vegas Magallánicas.

Para la Región de Magallanes la conservación y buen manejo de las Vegas son un componente decisivo para la producción de los sectores agropecuarios y forestal. Las Vegas tienen la característica de poseer una mayor disponibilidad de agua y una menor evapotranspiración, y según Domínguez (2019), alcanzan producciones de entre 3.000-5.000 kg MS/ha/año, mientras que pastizales naturales de coirón aledaños (*Festuca gracillima*), producen solo entre 150-700 kg MS/ha/año. Esta significativa función ecológica y productiva se ha visto perjudicada, debido al sobrepastoreo y sistemas de drenaje mal diseñados.

Las Vegas siempre se han visto desde el enfoque de la producción de forraje. Es por esto que desde principios del siglo pasado las Vegas se han estado drenando, para establecer praderas artificiales, lo que ha provocado pérdida de agua, desencadenando finalmente la pérdida del recurso hídrico. Debido a esto, muchas Vegas que acumulaban grandes cantidades de agua hoy están degradadas y sometidas a procesos erosivos, imposibilitándolas de cumplir con su funcionamiento ecosistémico.

Por lo anteriormente expuesto, es necesario cambiar el modelo productivo actual y caracterizar el funcionamiento de las Vegas no solo desde un enfoque productivo, sino también por su rol ecosistémico. Con el objetivo de sentar bases para aumentar la eficiencia del uso del agua y mejoramiento de la gestión hídrica de estas, aumentando la productividad y competitividad del sector silvoagropecuario.

De esta manera, el presente proyecto busca dar una solución a la gestión del recurso hídrico dentro de la Vega con el diseño y modelación de un sistema de drenes superficiales con la función de controlar de forma óptima la profundidad de la napa freática y no afecta el ecosistema de la Vega.

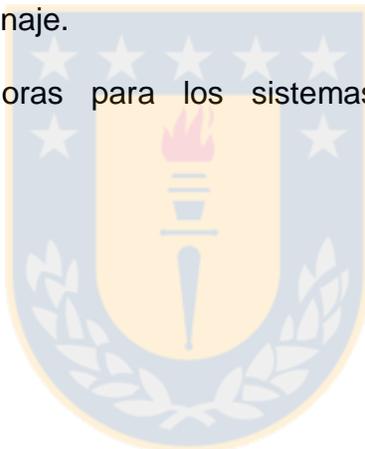
2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar modificaciones de los sistemas de drenajes de Vegas Magallánicas para mitigar el impacto en los ecosistemas asociados.

2.2 Objetivos específicos

- Presentar una metodología para evaluar el funcionamiento hidráulico de los canales que reciben agua desde los drenes.
- Desarrollar una metodología para evaluar el funcionamiento del sistema de drenaje.
- Proponer mejoras para los sistemas de drenajes de Vegas Magallánicas.



3. MARCO TEÓRICO

El presente estudio está basado en los resultados del proyecto FIC- “Evaluación del balance hídrico de Vegas: Una estrategia para mejorar la gestión hídrica a nivel predial y aumentar la resiliencia al cambio climático.” Región de Magallanes 2018-2020. Código BIP: N° 40001859, en adelante proyecto Vegas, que fue ejecutado por INIA y cuyos resultados se describen en el Boletín N° 435 del INIA, donde el autor profundizó sobre el balance hídrico en humedales de uso agropecuario, dando un primer paso al mejoramiento de la gestión hídrica para la Región de Magallanes (Ivelic-Sáez et al., 2021).

3.1 Vegas magallánicas

En la Patagonia, tanto chilena como Argentina, las Vegas son humedales con un área temporaria o permanentemente saturada de agua, que recibe aportes superficiales y/o subsuperficiales de agua, caracterizados por poseer humedad permanente y vegetación herbácea hidrófila con fisonomía de pradera. Son ambientes de relieve plano cóncavo, en posiciones relativas bajas del paisaje, como arroyos, ríos, surgentes o agua de escorrentía subsuperficial o napa freática.

Otros autores mencionan que este término se refiere a “praderas y pastos muy densos y verdes directamente asociados a presencia de agua dentro o cerca de la superficie del suelo” (Movia 1984). En el mismo ámbito, “Mallín” o “Malliñ” es un término Mapuche, cuyo significado se refiere a un suelo herboso y herbáceo, ubicado en las laderas de las montañas o en las zonas más planas, con presencia

de aguas subterráneas. Este término incluye las hierbas típicas que desarrollan en los humedales (Vuletín, 1979).

En la Patagonia los términos “Vegas o mallines” tienen la definición muy similar, pero se diferencian porque, se denomina los mallines a aquellos humedales ubicados en relieves planos, particularmente en el fondo de los valles, mientras que el término “Vega” se reserva a un área o zona de inmersión sin una característica geográfica asociada. En ambos casos se hace referencia a la disponibilidad de agua y a la vegetación herbácea y de praderas que proporciona al mallín un pastizal húmedo, reconocido por tener, al menos parcialmente, suelos mal drenados e hidrofílicos.

Según lo expuesto por Salgado (2000), el principal problema de las Vegas o mallines es causado por la saturación permanente o con escasa a nula variación del nivel freático durante las épocas menos lluviosas del año. No obstante, el panorama actual es diferente, ya que ahora hay que considerar los aspectos ambientales del manejo de los sistemas productivos.

En un sinnúmero de Vegas se han construido sistemas de drenaje que consiste en la construcción de zanjas que no tienen un adecuado diseño hidráulico, sin considerar parámetros ambientales ni el nivel freático óptimo para el desarrollo del cultivo presente en la Vega (Figura 1).



Figura 1. Drenes ubicados en la Vega Magallánica de la estación experimental Kampenaike. Fuente: Elaboración propia.

Según lo expuesto por Domínguez (2019), una cantidad significativa de Vegas magallánicas han sufrido un deterioro producto del sobre pastoreo y de la construcción de sistemas de drenajes que se usaban para extraer agua y habilitar más superficies de praderas, lo que ha llevado a una degradación casi irremediable de algunos sectores haciendo necesario un manejo que permita su recuperación.

El suelo de las Vegas posee un subsuelo compacto, formado por materiales finos depositados por la acción glacial y lacustre, el cual restringe marcadamente el drenaje por infiltración. Al presentarse en depresiones del relieve o en valles surcados por cursos de agua, determinan condiciones de pantano o semi pantanosas, con un nivel freático subsuperficial, frecuentemente anegables en períodos de altas precipitaciones y al comienzo de la estación de deshielo primaveral. Poseen un alto porcentaje de materia orgánica sin descomponer. Pueden presentar un suelo profundo, con mucha materia orgánica que permite el desarrollo de una cubierta vegetal densamente cespitoso (Domínguez, 2019).

Adicionalmente, las Vegas poseen un importante valor productivo por la formación de material vegetal ya que estos sectores poseen una alta producción para la ganadería, pudiendo alcanzar producciones de 3.500 a 5.500 KgMS/ha/año de acuerdo con Domínguez (2019). Mientras que pastizales como el corion producen entre 150 a 700 KgMS/ha/año. Y esta producción se ha visto afectada por la construcción de los drenes anteriormente mencionados.

3.2 Descripción área de estudio

El área de estudio se ubica en la Provincia de Magallanes, Región de Magallanes (Figura 2). El área de estudio (Vega o mallín) pertenece al distrito agroclimático 12-4: Punta Arenas, que tiene como características principales el ser estepa fría con régimen de humedad sub húmedo húmedo (BSkShh). La Vega posee una altitud aproximada de 78 msnm y una superficie aproximada de 16.000 km². La temperatura varía entre un máximo de enero de 15,7 °C y un mínimo de julio de -1,4 °C. Tiene un promedio de 58 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 137 heladas. El periodo de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 3 meses. La precipitación media anual es de 444 mm y un periodo seco de 4 meses, con un déficit hídrico de 378 mm/año. El período húmedo dura 1 mes durante los cuales se produce un excedente hídrico de 0 mm (Santibáñez, 2017).

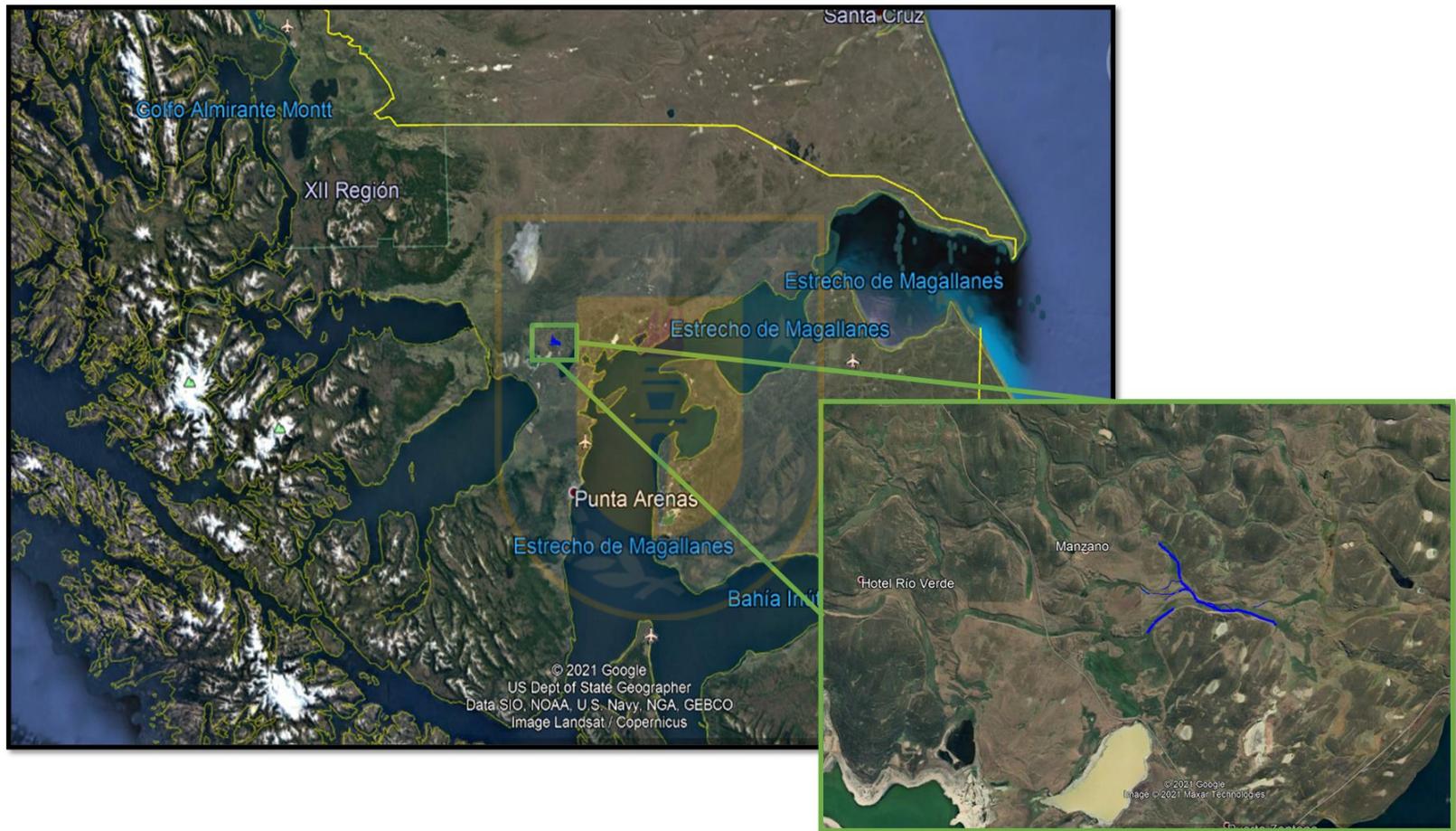


Figura 2. Mapa ubicación del área de estudio, Vega Magallánica. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Balance hídrico

En la Figura 3 se puede observar la dirección del escurrimiento de agua en el área de estudio específicamente en la Estación Experimental Kampenaiké. La presencia de la Vega se ve afectada por la disponibilidad de agua aportante, ya sea por precipitación, aguas subterráneas o escorrentía superficial.



Figura 3. Imagen satelital de la Vega en estudio, con las líneas amarillas indican la dirección principal del escurrimiento de agua. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.

Para describir el balance hídrico en este tipo de humedales requiere entender no solamente el entorno de la Vega de estudio, sino que también las condiciones climáticas del humedal y la cuenca que lo alimenta (Ivelic-Saez et al., 2021). Es por esto que el balance hídrico es determinado por la ecuación de conservación de la masa, que se define como la suma de los flujos de agua que ingresan al humedal menos los flujos de agua que salen de este, esto dando como resultado la variación de agua almacenada para un cuerpo de agua y que puede ser representado por la Ecuación 1.

$$\left[Q_{sp} + Q_{sb} + \frac{P + D}{\Delta T} \cdot A \right] - \left[Q_{ef} + Ext + Inf + \frac{ET}{\Delta T} \cdot A \right] = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad [1]$$

Donde:

Q_{sp} : caudal superficial desde la cuenca aportante ($m^3 \text{ mes}^{-1}$)

Q_{sb} : flujo de agua subterránea aportante ($m^3 \text{ mes}^{-1}$)

P : precipitación anual aportante (m)

D : Derretimiento de nieve (m)

Q_{ef} : caudales efluentes del cuerpo de agua ($m^3 \text{ mes}^{-1}$)

Ext : extracciones antrópicas ($m^3 \text{ mes}^{-1}$)

Inf : infiltración que pueda ocurrir a través del lecho ($m^3 \text{ mes}^{-1}$)

ET : evapotranspiración (m)

A : área del humedal en estudio (m^2)

ΔT : variación de tiempo en que un proceso aportante o extraente (mes^{-1})

$\frac{\Delta V}{\Delta T}$: variación de almacenamiento dependiente del humedal ($m^3 \text{ mes}^{-1}$)

INIA estudió el balance hídrico de las Vegas (Ivelic-Saez et al., 2021) donde se demuestran las entradas y salidas de agua del ecosistema Vega coironal y concluyeron que los flujos de agua subterráneas son reducidos, debido a que los gradientes hidráulicos son bajos y que el medio no posee conductividades hidráulicas altas. Por ello, los flujos de aguas subterráneas no explican la existencia de las Vegas, sino que se deben considerar otras entradas de agua como los aportes directos de infiltración de aguas lluvia y los aportes de esorrentía lateral.

En la Tabla 1 se muestran los resultados del balance hídrico del estudio realizado por INIA (Ivelic-Saez et al., 2021).

Tabla 1. Resultado balance hídrico de Vega coironal en la estación experimental Kampenaike (mm mes⁻¹). Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.

Datos (mm mes ⁻¹)	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sept-19	oct-19	nov-19	dic-19	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20
Humedad del suelo	665,6	662,3	661,6	654	658,5	657,2	646,5	634,7	650,7	663,6	650,8	655,5	658,2	665,4	678,3
Infiltración lluvia	68,4	21,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	25,8	31,7	41,4	7,0	35,0	8,9	0,0	0,0
Agua subterránea	211,5	69,0	39,9	33,1	12,1	32,7	14,3	81,7	103,2	134,4	23,4	114,4	30,1	160,5	29,6
Recarga	190,2	19,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,2	0,0	26,2	0,0	103,1	0,0
Humedad final del suelo	664,4	702,1	723,8	713,7	713,7	690,3	620,8	634,8	650,3	686,7	605,9	650,4	635,8	670,4	683,8

En la Figura 4 se observa la modelo conceptual propuesta por el estudio desarrollado por INIA (Ivelic-Saez et al., 2021).

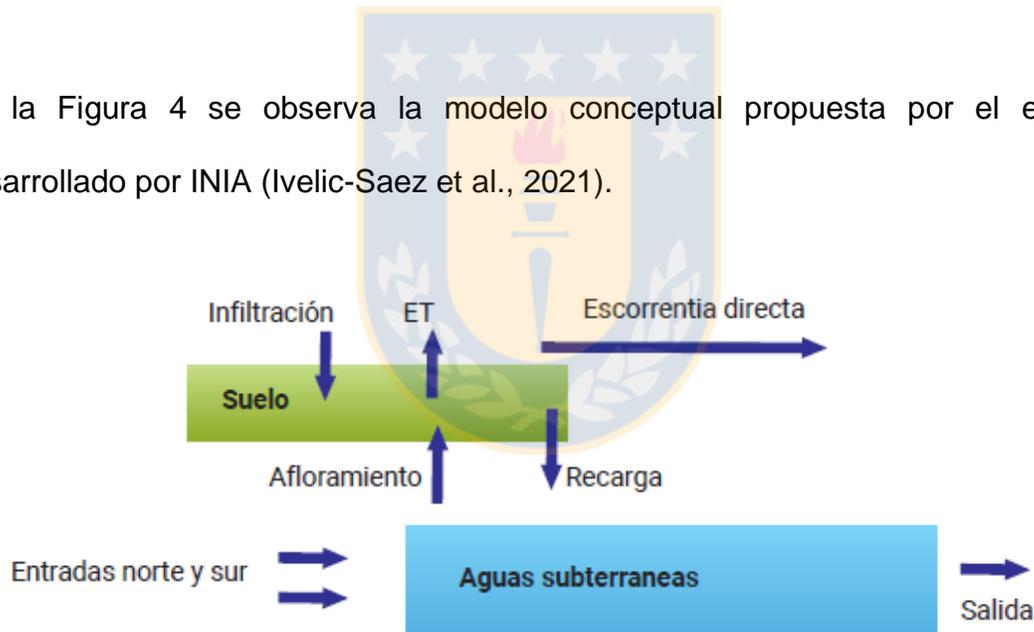


Figura 4. Modelo conceptual del balance hídrico en la Vega de la estación experimental Kampenaike. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.

3.4 Fluctuación nivel freático en la Vega de estudio

Para complementar el estudio del balance hídrico de la Vega, se presentan las mediciones de nivel freático (Figura 5), mediante sensores con su ubicación respectiva en la Figura 6 y que se puede contrastar con la elevación topográfica de los drenes para una posterior modelación, mostrando fluctuaciones anuales de 0,9 m en promedio, alcanzando valores máximos en invierno y mínimos al final del verano.

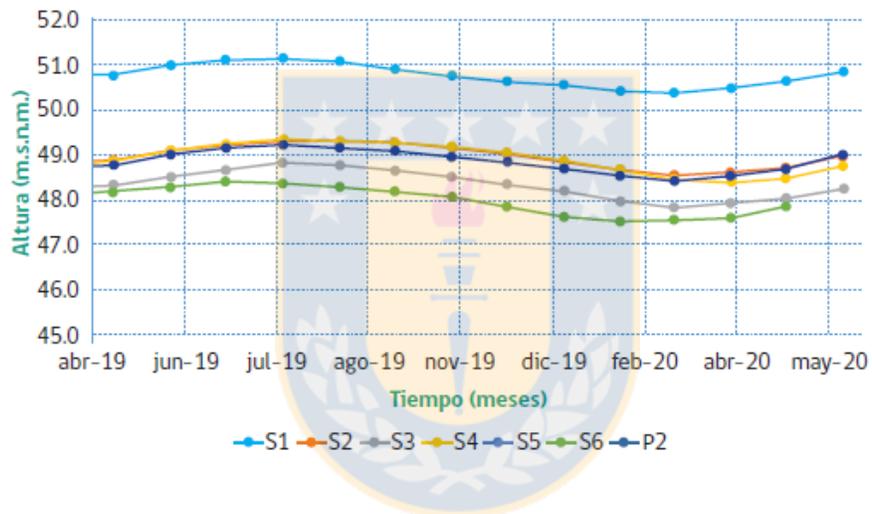


Figura 5. Fluctuaciones mensuales del nivel freático (m.s.n.m) en la Vega magallánica de estudio. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.



Figura 6. Área de estudio, donde los puntos amarillos indican las ubicaciones de los sensores de nivel freático, el polígono rojo muestra la Vega estudiada y las flechas rojas la dirección de flujo de aguas subterráneas. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.

Descripción de ubicación de los sensores.

- Flujo Norte: diferencia de nivel entre los sensores S1 y S6.
- Flujo Sur: diferencia de nivel entre los sensores S2 y S3.
- Flujo Saliente: diferencia de nivel entre los sensores S4 y S5.

3.5 Características físico- hídricas del suelo

En el capítulo 02 del estudio reportado por Ivelic- Saez et.al. (2021) se analizaron las relaciones entre las características ambientales, edáficas y movimiento de agua en la zona no saturada. Se profundizo en el estudio de las características físico-hídricas del suelo y un análisis preliminar de la dinámica de agua en un sistema de

Vega y como dicha dinámica se relaciona con las propiedades físicas del suelo en el cual se encuentra el área de estudio.

En la Figura 7 se puede observar la ubicación de muestreo (calicatas) y donde se midió el contenido volumétrico de agua en función de pF (Figura 8), con C4 en una ubicación cercana a drenes y del cual se recopilarán las características físico-hídricas de la calicata más cercana a los drenes.



Figura 7. Ubicación calicatas (C3, C4 y C5) punto de muestreo (amarillo) y medición del nivel freático. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.

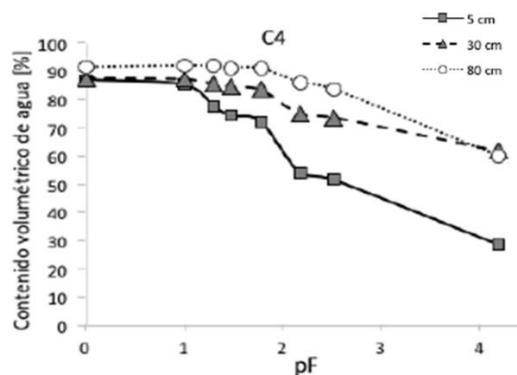


Figura 8. Contenido volumétrico de agua (%) en función del potencial mátrico del suelo representado por pF como el log (Ψ) con potencial mátrico (Ψ) en m.c.a. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.

Tanto la calicata C3 y C4, el suelo puede mantenerse con una alta humedad a pesar de que haya alcanzado el punto de marchitez permanente, lo que significa que una gran cantidad de agua se encuentra en poros muy finos, y por tanto no está disponible para las plantas. Sin embargo, estos poros tienen la capacidad de transportar agua por ascenso capilar desde una fuente de agua subterránea, lo cual explica el hecho de que C3 y C4 mantengan constantes los niveles de humedad a lo largo del año.

La conductividad hidráulica saturada (K_s) muestra la capacidad que tiene el suelo para transmitir agua bajo condiciones de saturación. Reynolds et al. (2002), indican que un valor de K_s en la zona radical dentro del rango 1,63 a 2,63 log cm/d (0,43 a 4,32 m/d), puede considerarse “ideal” para promover una rápida infiltración y distribución del agua necesaria disponible para el cultivo, así como fomentar el drenaje rápido del exceso de agua y reducir la escorrentía superficial y erosión del suelo.

Según los datos de suelo extraídos desde del Boletín INIA N°435, para el promedio de la K_s entre las calicatas C3 y C4 en los primeros 50 cm de profundidad, la K_s es de 2,8 m/día y posterior a los 50 cm de profundidad hasta la estrata impermeable una K_s de 1,9 m/día, caracterizándose el suelo como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del suelo promedio ubicada en la Vega coironal en la estación experimental Kampenaike. Fuente: Ivelic-Saez et al., 2021.

P (cm)	TS	Da (g/cm ³)	Ks (m día ⁻¹)
0-50	Franco	0,16	2.8
50- 100+	Franco arcilloso limoso	0,12	1,9

P: Profundidad; TS: tipo de suelo; Da: Densidad Aparente; Ks: Conductividad hidráulica saturada.

3.6 Sistemas de drenaje

En Chile, según el Reglamento de la Ley 18.450 el término “obras de drenaje”, se define como tal a las construcciones y elementos destinados a evacuar el exceso de las aguas superficiales y subsuperficiales de los suelos, que constituyen una limitante para el desarrollo de los cultivos.

Por la definición anterior es necesario diferenciar entre drenaje superficial y subterráneo. Un sistema de drenaje superficial es el conjunto de obras requeridas para evacuar o eliminar los excesos de agua acumulada en la superficie del suelo y un sistema de drenaje subterráneo es el conjunto de obras necesarias para evacuar o eliminar los excedentes de agua, acumulados en el interior del suelo, a través de un control de la profundidad de la napa freática.

Los problemas de drenaje tienen su origen en diversas causas, entre ellas están: la recarga, el tipo suelo, existencia de un estrato impermeable y la topografía. Estas causales pueden presentarse individualmente o como una combinación de dos o más de ellas, situación que obliga a conocer exactamente cuál es el origen y cantidad de la recarga, para poder hacer un adecuado dimensionamiento del sistema de drenaje.

Los tipos de recarga se diferencian en la forma en la que aportan exceso de agua a la zona de drenaje, la más común la recarga por precipitación cuando esta excede a la evapotranspiración, el segundo tipo de recarga es por infiltración que puede provenir de aguas externas al área de mal drenaje, tales como: pérdidas por filtración en cauces naturales y/o canales que cruzan el área afectada; percolación de regadíos realizados en zonas o áreas más elevadas topográficamente; flujos subterráneos provenientes de zonas vecinas situadas a una cota igual o superior.

Por otra parte, el suelo y la topografía, donde existen restricciones al drenaje natural pueden ser de diverso origen. Entre las más comunes es posible mencionar la formación de horizontes o estratas lenta o muy lentamente permeables; estratas u horizontes cementados; posiciones topográficas desfavorables, etc. Consecuentemente, el buen o mal drenaje de un suelo es la resultante de factores externos e internos del suelo. En lo que se cuenta la pendiente, que influye sobre el escurrimiento superficial; la permeabilidad y el material sobre el cual descansa el suelo.

Toda obra de drenaje agrícola tiene como objetivo crear las condiciones adecuadas para el desarrollo de los cultivos y de esta forma obtener mayores rendimientos y mejor calidad de los productos. De acuerdo con las recomendaciones del académico Jorge Ivelic (comunicación personal 19 de julio 2021) se considera una práctica adecuada que la pradera de las Vegas posea un nivel freático recomendado entre los 0,2 a 0,4 m de profundidad (Figura 17). Esta condición óptima produce la disminución del contenido de humedad de las estratas superiores

del suelo y, como consecuencia de ello, el aire puede penetrar más fácilmente y quedar disponible para las plantas.

Por todas las consideraciones anteriormente expuestas es de gran importancia relacionar las variables físicas, químicas, biológicas e hidrológicas que componen un sistema de drenaje y que en el siguiente diagrama (Figura 9) presentado por Salgado (2000) es posible apreciar las interrelaciones como consecuencia de la instalación de un sistema de drenaje.



Figura 9. Diagrama de los diferentes aspectos a considerar para un sistema de drenaje agrícola (Salgado 2000).

4. METODOLOGÍA

4.1 Identificación área de estudio

El área de estudio se emplaza en la Estación Experimental Kampenaike perteneciente al INIA, ubicado en Punta Arenas, Región de Magallanes (UTM 4.161.945 m a 4.159.511 m Norte y 362.136 m a 365.107 m Este), referidas al Datum WGS 84 Huso 19S (Figura 10). El área de estudio se ubica a una altitud máxima de 55 m sobre el nivel del mar, y posee una superficie de 0,22 km². En el Proyecto Vegas se consideraron 4 sensores de nivel freático (S3, S4, S5 y S6) y 3 calicatas (C3, C4 y C5) para la caracterización del perfil de suelo.



Figura 10. Área de estudio, sensores de nivel freático (S3, S4, S5 y S6), calicatas (C3, C4 y C5), sistema de drenaje (líneas azules), delimitación del área de estudio (polígono rojo). Fuente: Elaboración propia.

4.2 Recarga Vega Magallánica

Tanto para el modelo de la Ecuación de Hooghoudt y Ecuación de Ernst considera la recarga superficial del área de estudio, en base a los datos obtenidos por balance hídrico del boletín N° 431 de INIA se considerará la recarga superficial como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración en la superficie de la Vega y en base a los datos presentados en la **Tabla 3** se pueden apreciar que en tan solo 4 meses del año existe recarga superficial, mientras que el resto de los meses presenta un déficit hídrico.

Tabla 3. Balance hídrico de Vega coironal en la estación experimental Kampenaike, con precipitación (P), evapotranspiración (ET), recarga superficial (RS) en (mm mes⁻¹), (Ivelic-Saez et al., 2021).

Año	Mes	P (mm mes ⁻¹)	ET (mm mes ⁻¹)	RS (mm mes ⁻¹)	
2019	Abril	85,5	45,2	40,3	
	Mayo	26,6	33,3	-6,7	
	Junio	31,6	18,2	13,4	
	Julio	25,2	19,1	6,1	
	Agosto	8,6	36,2	-27,6	
	Septiembre	12,6	56,1	-43,5	
	Octubre	4,8	87,6	-82,8	
	Noviembre	32,3	93,6	-61,3	
	Diciembre	39,6	119,3	-79,7	
	2020	Enero	51,8	106,3	-54,5
		Febrero	8,8	111,2	-102,4
		Marzo	43,7	78,7	-35,0
Abril		11,1	53,5	-42,4	
Mayo		61,8	22,9	38,9	
Junio		21,9	16,2	5,7	

4.3 Modelo numérico

La diferencia entre un sistema en régimen estacionario y transitorio se basa principalmente en la dinámica de la recarga. La teoría estacionaria se basa en suponer que la recarga a las aguas subterráneas, desde precipitaciones, es igual a la descarga de drenaje; esto hará que el manto freático permanezca a la misma altura mientras continúe la recarga utilizando en las ecuaciones de Hooghoudt y Ernst. Mientras que el régimen transitorio la recarga del nivel freático varía con el tiempo como por ejemplo la existencia un riego o una alta precipitación en un corto periodo de tiempo.

Por ello se consideró una modelación bajo un régimen estacionario, donde no existe fluctuación del nivel freático, sin embargo, el nivel freático posee una curva característica, siendo su elevación más alta a mitad de camino entre los canales de drenaje (Figura 11). Suponiendo un sistema homogéneo y que las condiciones del suelo son similares, se traza una simetría en torno al eje y, así es suficiente considerar la mitad del sistema entre los dos drenes. Para describir el flujo de aguas subterráneas a un sistema de drenaje de este tipo se realizan las siguientes suposiciones:

- Flujo bidimensional.
- Distribución uniforme de la recarga.
- Suelos homogéneos e isotrópicos.

La mayoría de las ecuaciones de drenaje se basan en la suposición Dupuit-Forchheimer, es decir, suponiendo líneas de flujo paralelas y horizontales. Esto

permite reducir el problema de flujo bidimensional a un flujo unidimensional. Esta suposición es correcta siempre y cuando el subsuelo impermeable esté cerca del canal de drenaje.

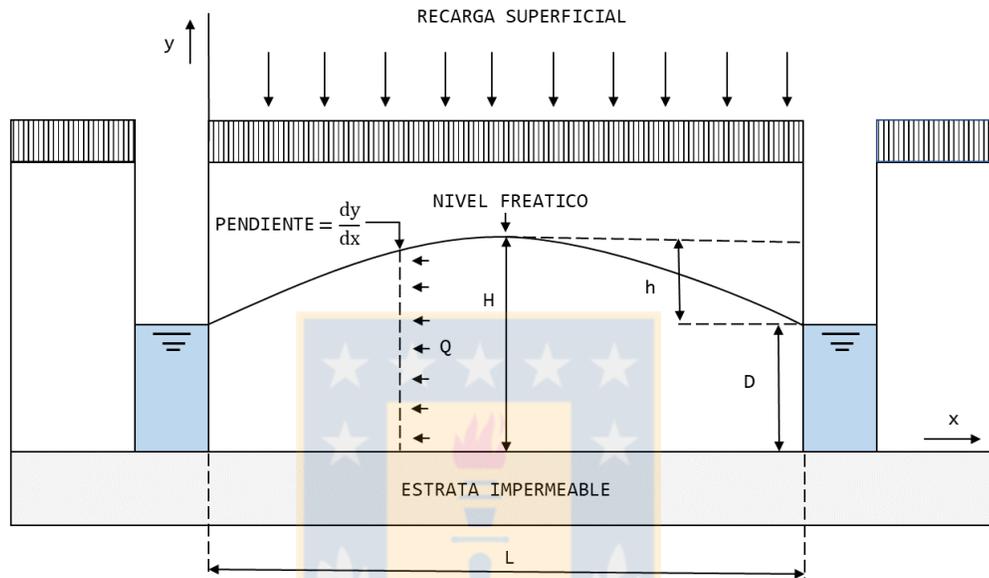


Figura 11. Esquema de un sistema de drenaje agrícola superficial. Nivel freático (H), nivel hidráulico (D), diferencia entre el nivel freático e hidráulico (h), flujo de salida hacia el canal de drenaje (Q). Fuente: Elaboración propia en base a Salgado (2000).

4.3.1 Ecuación de Hooghoudt

La ecuación de drenaje de Hooghoudt (Hooghoudt, 1940) da una relación matemática de los parámetros involucrados del drenaje superficial de tierras planas mediante un sistema de zanjas o drenes horizontales y paralelos, colocados a igual profundidad y sujetos a una recarga constante distribuida uniformemente sobre el área (Figura 11). Desde la teoría, la ecuación de Hooghoudt considera que el dren llega hasta el tope de la zona impermeable y solo se considera flujo vertical y flujo horizontal (Figura 12)

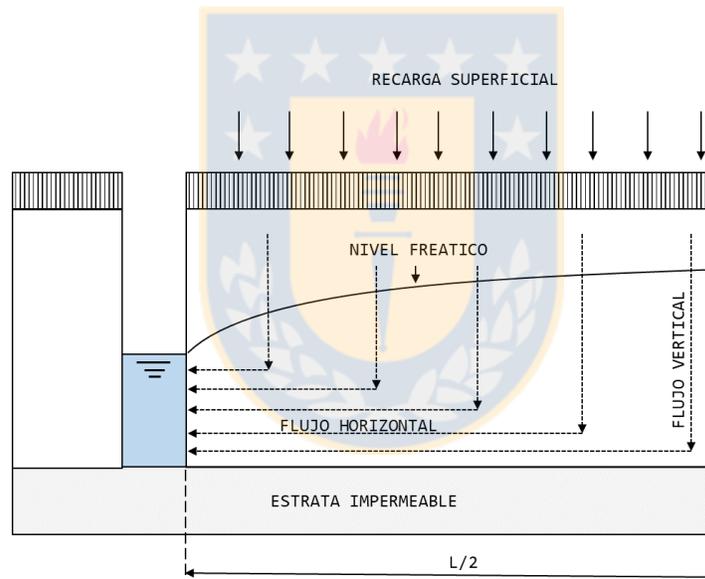


Figura 12. Perfil del movimiento de agua en el suelo, con flujo vertical y horizontal. Fuente: Elaboración propia en base a Salgado (2000).

Con existencia de un flujo vertical y horizontal en el perfil de suelo, se considera la ley de Darcy (Ecuación 2 y Ecuación 3) que describe el movimiento de agua a través de un medio poroso.

$$Q = -k \frac{\Delta h}{\Delta L} A \quad [2]$$

$$q = -k \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad [3]$$

Donde:

Q : Caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

k : conductividad hidráulica (m s^{-1}).

$\frac{\Delta h}{\Delta L}$: gradiente hidráulico (adimensional).

A : área de la sección evaluada (m^2).

q : velocidad de flujo que pasa por una sección por un área específica (m s^{-1}).

Δh : diferencial de altura o potencial de agua (m).

ΔL : largo de la sección evaluada (m).

Bajo los supuestos de una afluencia constante y que la entrada (recarga) es igual a la salida, el gradiente potencial también es constante. Por Darcy, se tiene un gradiente potencial $\frac{h}{L/2}$, sin embargo, para la conductividad hidráulica (k) se implementa una variable auxiliar, que se muestra en la Ecuación 4 llamada conductividad aparente (k_a). La conductividad aparente (k_a), permite que cuanto mayor sea el espesor de la capa D entre el nivel del agua en la zanja y la capa impermeable (Figura 11), más rápido llegará el agua al dren. Además, parecerá que el agua (en promedio) ha llegado desde una distancia ($L/4$), ya que el agua que

cae en el borde de la canal instantáneamente, mientras que el agua del centro del campo tomará el doble de tiempo que la de $L/2$. En consecuencia, cuanto mayor sea la distancia L , menor será la conductividad aparente.

$$k_a = k \left(\frac{D}{L/4} \right) \quad [4]$$

Donde:

k_a : conductividad aparente ($m \ s^{-1}$).

D : altura de agua del canal o zanja de drenaje (m).

L : longitud entre las drenes evaluados (m).

La ecuación de Hooghoudt aborda dos casos como se puede observar en la Figura 13., donde se presume en el primer caso que el agua de la recarga fluye entre la capa impermeable y el nivel hidráulico del dren (D) (Ecuación 5).

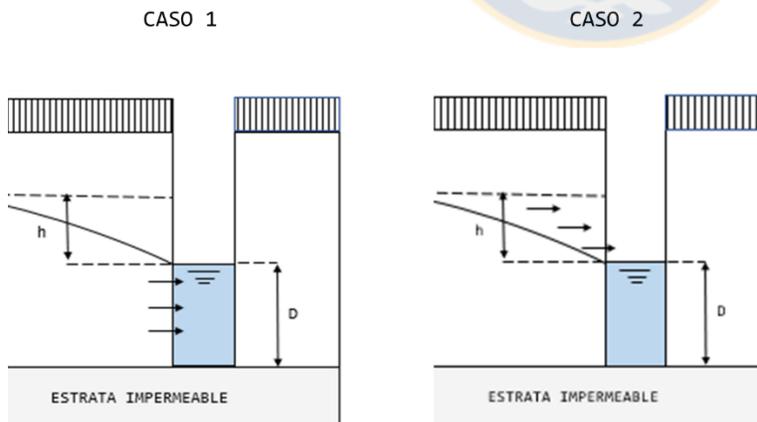


Figura 13. Descripción de los casos abordados por la ecuación de Hooghoudt. Fuente: Elaboración propia.

$$R = k \left(\frac{D}{L/4} \right) \left(\frac{h}{L/2} \right) \quad \text{ò} \quad R = \frac{8kDh}{L^2} \quad [5]$$

R : recarga superficial (m día⁻¹)

k : conductividad hidráulica (m día⁻¹)

h : diferencia de altura entre el nivel freático y nivel hidráulico del canal (m)

En un segundo caso se asume que el flujo de agua se mueve entre el nivel hidráulico (D) y el nivel topográfico de la zanja y no hay capa que transporte agua por debajo del nivel del agua del dren (D=0) (Figura 13), por lo tanto, ahora se tiene que el espesor de la capa a través de la cual el agua puede fluir es en promedio sólo ($h/2$). El gradiente es el mismo y el agua todavía puede llegar desde una distancia ($L/4$). Por lo tanto, la conductividad aparente se estima mediante la Ecuación 6 y la recarga para el segundo caso con la Ecuación 7.

$$k_a = k \left(\frac{h/2}{L/4} \right) \quad [6]$$

$$R = k \left(\frac{h/2}{L/4} \right) \left(\frac{h}{L/2} \right) \quad \text{ò} \quad R = \frac{4kh^2}{L^2} \quad [7]$$

Finalmente, bajo un enfoque estacionario en el primer y segundo caso se suman para dar una aproximación a el flujo de agua subterránea que capta el dren, como se aprecia en la Ecuación 8 y en la Ecuación 9 la base para determinar la longitud apropiada entre 2 drenes.

$$R = \frac{8kDh}{L^2} + \frac{4kh^2}{L^2} \quad [8]$$

$$L^2 = \frac{(8kDh) + (4kh^2)}{R} \quad [9]$$

Una vez conocida la Ecuación 9, como base para diseñar sistemas de drenaje superficial, se contextualiza al área de estudio ya que la característica distintiva del presente diseño es la preexistencia de un sistema de drenaje. Por lo que, en el caso particular, el objetivo es determinar el nivel hidráulico del dren o canal (D), modificando la longitud entre los drenes preexistentes (L), de tal modo de controlar el nivel hidráulico con compuertas.

Es por ello que la Ecuación 9 se ordena en función del nivel hidráulico del canal (D), dando como resultado un polinomio de segundo grado como se muestra en la Ecuación 10.

$$-12KD^2 + 8KHD + (4KH^2 - RL^2) = 0 \quad [10]$$

4.3.2 Ecuación de Ernst

Hay casos para los que no se puede aplicar la ecuación de Hooghoudt, como perfiles con varias capas y zanjas poco profundas, drenajes donde los flujos tienen una fuerte componente radial, o donde el flujo vertical es relativamente lento. Bajo este tipo de situaciones es aplicable la ecuación de Ernst (Ecuación 11), la cual describe la pérdida de la carga total (Δh_t) como la sumatoria de cuatro componentes ($\Delta h_v, \Delta h_h, \Delta h_r$ y Δh_e) y se puede observar con más detalle en la **Figura 14** y Ecuación 11.

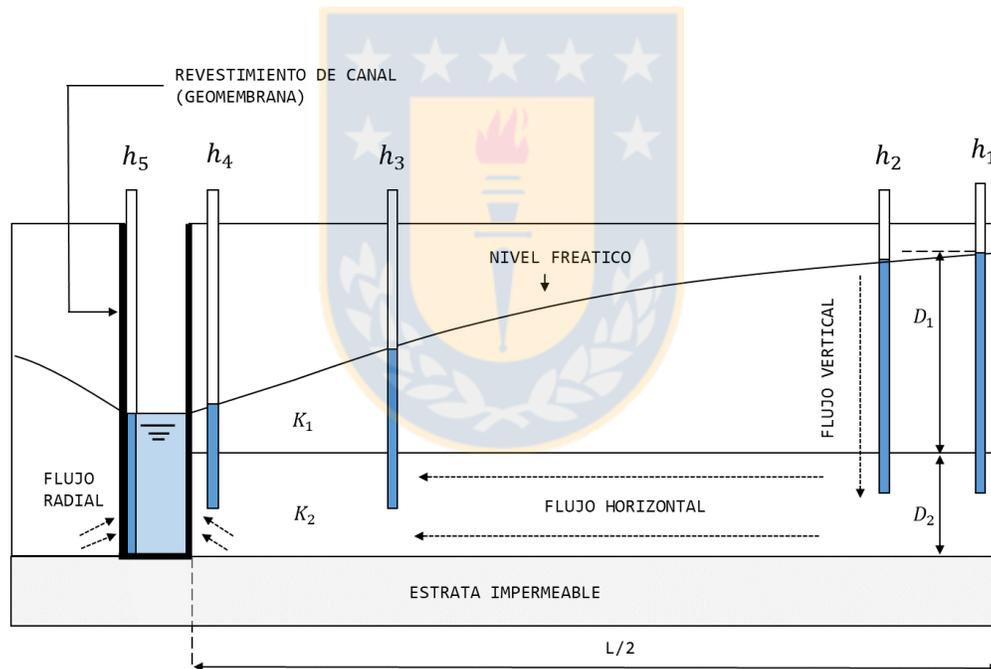


Figura 14. Componente del flujo hacia los drenes, según la teoría de Ernst. Conductividad hidráulica del estrato superior (K_1), Conductividad hidráulica del estrato inferior (K_2), distancia desde el nivel del agua en el punto medio entre los drenes al límite de las estratas (D_1), espesor de la estrata inferior (D_2), carga hidráulica (Δh) y estrato impermeable (E.I). Fuente: Elaboración propia en base a Salgado (2000).

$$\Delta h_t = \Delta h_v + \Delta h_h + \Delta h_r + \Delta h_e \quad [11]$$

Donde:

$$h_1 - h_2 = \Delta h_v \quad : \text{pérdidas de carga por flujo vertical (m)}$$

$$h_2 - h_3 = \Delta h_h \quad : \text{pérdidas de carga por flujo horizontal (m)}$$

$$h_3 - h_4 = \Delta h_r \quad : \text{pérdidas de carga por flujo radial (m)}$$

$$h_4 - h_5 = \Delta h_e \quad : \text{pérdidas de carga por flujo de entrada (m)}$$

$$h_1 - h_5 = \Delta h_t \quad : \text{pérdidas de carga total (m)}$$

Según Ernst, el flujo de agua subterránea se divide en las direcciones vertical, horizontal, radial y de entrada, que se expresan en función de la recarga, la conductividad hidráulica de las estratas, la transmisibilidad y la longitud entre los drenes, como se puede apreciar desde la Ecuación 12 hasta la Ecuación 15.

$$\Delta h_v = \frac{RD_v}{K_v} \quad [12]$$

$$\Delta h_h = \frac{RL^2}{8 \sum (KD)_h} \quad [13]$$

$$\Delta h_r = RW_r L \quad [14]$$

$$\Delta h_e = r_e q_u \quad [15]$$

Donde:

L : espaciamiento (m)

R : recarga superficial (m día⁻¹).

$(KD)_h$: transmisividad de la (s) estrata (s) a través de la(s) cual(es) ocurre flujo horizontal (m² día⁻¹).

D_v : espesor de la estrata a través de la cual ocurre flujo vertical (m)

K_v : conductividad hidráulica vertical, se asume conductividad hidráulica general (m día⁻¹).

W_r : coeficiente de resistencia radial (día m⁻¹).

Δh_t : pérdida de carga total (m)

En cuanto al coeficiente de resistencia radial (W_r), éste puede expresarse como:

$$W_r = \frac{1}{\pi K_r} \ln \left(\frac{a D_r}{u} \right) \quad [16]$$

Donde:

k_r : conductividad hidráulica radial, se asume conductividad hidráulica del estrato en donde predomine el flujo radial (m día⁻¹).

a : factor geométrico de resistencia radial (adimensional).

D_r : espesor de la estrata en la cual ocurre flujo radial (m).

u : perímetro mojado del dren o zanja (m).

De acuerdo con Salgado (2000), el factor geométrico (a) depende del perfil del suelo y la posición de los drenes. En un suelo homogéneo el factor geométrico es igual a uno ($a=1$). En un suelo estratificado el factor geométrico depende si los drenes están en la estrata superior o en la estrata inferior. Si los drenes se encuentran en la estrata inferior, se asume que el flujo radial se restringe a esta estrata y por lo tanto $a = 1$.

Según Salgado (2000), se desprecia el componente Δh_e correspondiente a la pérdida de carga del flujo de entrada ya que es utilizado en caso de que exista una tubería de drenaje o un dren francés con geomembrana y gravilla, sin embargo, en el caso particular con drenes superficiales, se reemplazan las componentes representadas en la Ecuación 17.

$$\Delta h_t = \frac{RD_v}{K_v} + \frac{RL^2}{8 \sum (KD)_h} + RW_r L \quad [17]$$

Contextualizando al área de estudio, con la preexistencia del sistema de drenaje y el objetivo de determinar el nivel hidráulico en el dren (h_5), se reemplaza la Ecuación 18 modificando la longitud entre los drenes preexistentes (L), de tal modo de controlar el nivel hidráulico con compuertas y mantener el nivel freático óptimo en la Vega.

$$\Delta h_t = h_1 - h_5 \quad [18]$$

Donde:

Δh_t : pérdidas de carga total (m)

h_1 : nivel freático (m)

h_5 : nivel hidráulico (m)

Reemplazando la Ecuación 18 en la Ecuación 17 se despeja el nivel hidráulico del canal (h_5), dando como resultado la Ecuación 19.

$$h_5 = h_1 - \frac{RD_v}{K_v} - \frac{R}{8 \sum (KD)_h} L^2 - RW_r L \quad [19]$$

4.4 Diseño hidráulico

El sistema de drenaje preexistente en la Vega Magallánica condiciona la hidráulica del canal con dimensiones preestablecidas, como se puede observar en la **Figura 15**, con un ancho de canal promedio de 1 m y la profundidad del canal que varía hasta llegar a la estrata impermeable. Esta variación tiene un rango de 1 m hasta 4 m, pero para fines de modelación se considerará una sección de canal estándar de un 1 m de ancho y 1 m de profundidad (**Figura 16**).



Figura 15. Drenes ubicados en una Vega Magallánica.
Fuente: Elaboración propia.

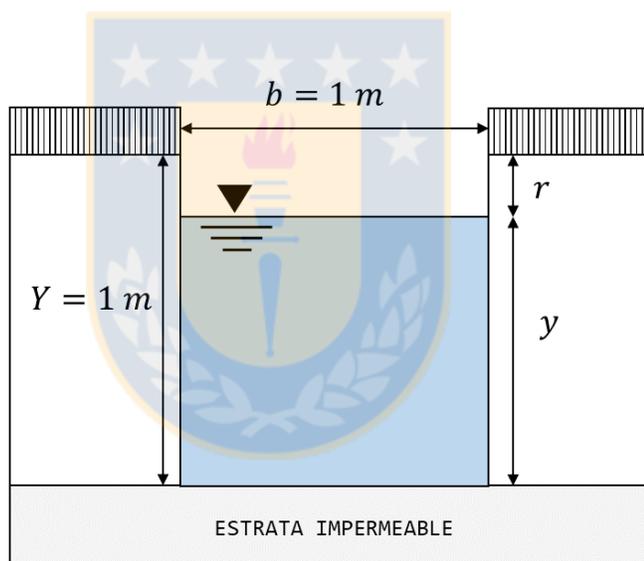


Figura 16. Sección estándar del canal de drenaje, con la altura total del canal (Y), revancha del canal (r), nivel hidráulico del canal (y).
Fuente: Elaboración propia.

Dado el caso que los canales de drenajes presentes en las Vegas Magallánicas pueden variar su profundidad, se puede complementar la Ecuación 20, para una mejor aproximación en los modelos de Hooghoudt y Ernst para una sección en específico como se puede observar en la Figura 17.

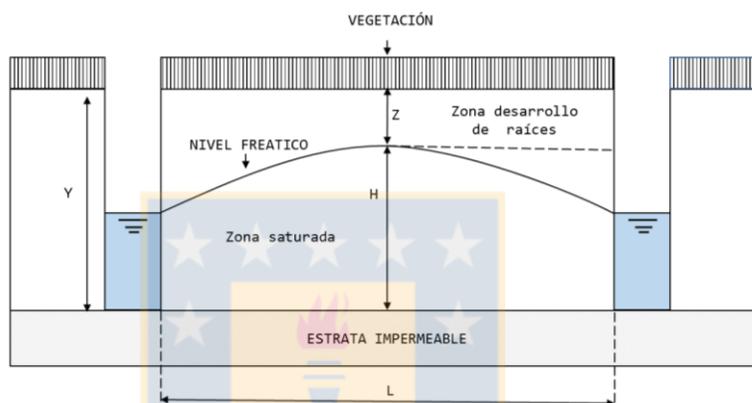


Figura 17. Caracterización del nivel freático recomendado (H), zona de desarrollo de raíces (z) y la altura total del canal (Y). Fuente: Elaboración propia.

$$H = Y - Z \quad [20]$$

Donde:

H : nivel freático recomendado (m)

Y : la altura total del canal (m)

Z : espesor de suelo para el desarrollo de raíces de la vegetación presente en la Vega Magallánica (m)

4.4.1 Diseño de compuertas

Las compuertas verticales o deslizantes son equipos que se utilizan para regular el nivel de aguas o para cerrar el paso del agua en canales (**Figura 18**). Al girar el vástago del mecanismo de maniobras la placa de cierre de la compuerta sube o baja, modificando la sección de paso del canal. Su empleo está recomendado para cargas de agua que generen esfuerzos hidrostáticos moderados ya que mayores esfuerzos requerirían el empleo de compuertas vagón (Ternicien, 2017).

El control de los niveles tiene como objetivo el mantener el nivel hidráulico, asimismo estarán equipadas con compuertas deslizantes. Las aplicaciones de las compuertas en el riego suelen ser:

- Control de flujo de agua: Mantener el caudal entrante deseado
- Control de inundaciones: Con la abertura de compuertas de descarga y cierre de compuertas de admisión.

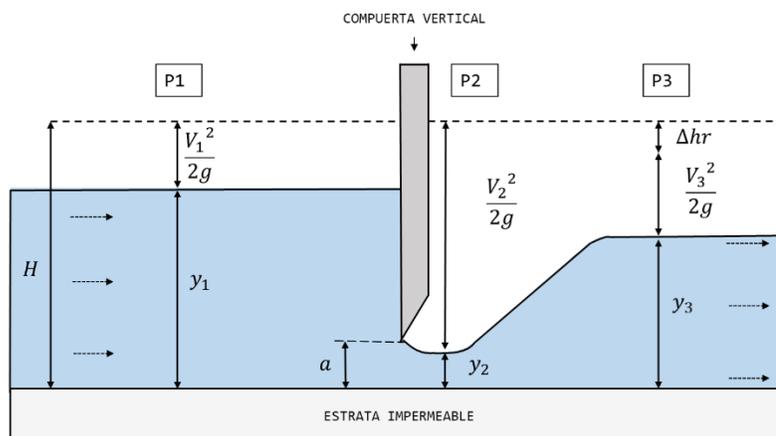


Figura 18. Representación de la hidráulica de una compuerta vertical.
 Nota: H : energía total o carga hidráulica total, Δh_r : Pérdida de energía al salir de la compuerta, a : altura de apertura de la compuerta (m), P1: punto 1, P2: punto 2, P3: punto 3. Fuente: Elaboración propia.

Normalmente para nombrar las alturas (y_1, y_2, y_3) se les denomina tirante o carga hidráulica, sin embargo, para fines de coherencia con los modelos de Hooghoudt y Ernst, se le denominará nivel hidráulico.

Desde la **Figura 18** se sostiene que la energía es la misma tanto a la altura y_1 , como la altura y_2 , como se observa en la Ecuación 21.

$$H = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad [21]$$

Donde:

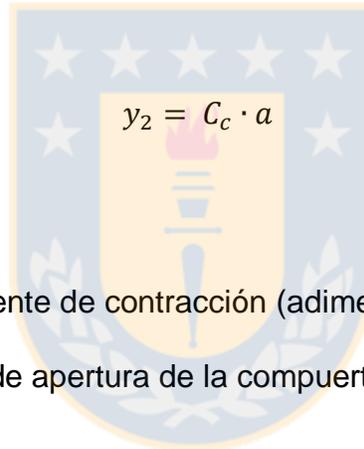
H : energía total o carga hidráulica total (m)

y_1 : nivel hidráulico aguas arriba de la compuerta (m)

y_2 : nivel hidráulico aguas abajo de la compuerta (m)

- V_1 : velocidad del flujo aguas arriba de la compuerta (m s^{-1})
- V_2 : velocidad del flujo aguas abajo de la compuerta (m s^{-1})
- g : aceleración de gravedad (m s^{-2})

El nivel hidráulico aguas abajo de la compuerta (y_2) está dado por un coeficiente de contracción o particular (C_c), donde las funciones que describen cada caso se encuentran en el Anexo A. La altura de apertura de la compuerta (a) se observa en la Ecuación 22.



[22]

Donde:

- C_c : coeficiente de contracción (adimensional).
- a : altura de apertura de la compuerta (m).

Reemplazando el nivel hidráulico aguas abajo de la compuerta (y_2) de la Ecuación 21 en la Ecuación 23.

$$H = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = C_c \cdot a + \frac{V_2^2}{2g} \quad [23]$$

Por la ecuación de continuidad producto de la ley de conservación de la masa, se determina que la cantidad de caudal (Q_1) que pasa por el punto 1 (P1), es

el mismo caudal (Q_2) que pasa por el punto 2 (P2), como se observa en la **Figura 18** y se demuestra en la Ecuación 24

$$Q_1 = Q_2 \quad [24]$$

El caudal esta dado por la velocidad del fluido y el área de la sección transversal del canal, reemplazando las variables en la Ecuación 25.

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad [25]$$

El área de la sección transversal del flujo está dada por el nivel hidráulico (y_1 ó y_2) y el ancho (b) del canal, reemplazando las variables en la Ecuación 26.

$$V_1 \cdot y_1 \cdot b = V_2 \cdot y_2 \cdot b \quad [26]$$

Bajo el supuesto que el ancho de la compuerta es igual al ancho del canal (b) y reemplazando (y_2) desde la Ecuación 22 en la Ecuación 27.

$$V_1 = \frac{y_2}{y_1} \cdot V_2 = \frac{C_c \cdot a}{y_1} \cdot V_2 \quad [27]$$

Se reemplaza la velocidad del fluido (V_1) de la Ecuación 27 en la Ecuación 23 que determina energía total o carga hidráulica total (H) en cada uno de los puntos asociados a la compuerta (Ecuación 28).

$$H = y_1 + \left(\frac{C_c \cdot a}{y_1} \right)^2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} = C_c \cdot a + \frac{V_2^2}{2g} \quad [28]$$

La Ecuación 29 muestra la velocidad del flujo en el punto 2 (V_2), donde se despeja la variable desde la Ecuación 28.

$$V_2 = \frac{\sqrt{2gy_1}}{\sqrt{\left(\frac{C_c a}{y_1} + 1\right)}} \quad [29]$$

Por la ecuación de continuidad (Ecuación 24), el caudal en el punto 2 está dado por la Ecuación 30.

$$Q = V_2 \cdot y_2 \cdot b \quad [30]$$

Se reemplaza la velocidad del flujo en el punto 2 (V_2), en la Ecuación 30 dando como resultado la Ecuación 31.

$$Q = \frac{\sqrt{2gy_1}}{\sqrt{\left(\frac{C_c a}{y_1} + 1\right)}} \cdot (C_c \cdot a) \cdot b \quad [31]$$

Se ordena la Ecuación 31 se obtiene un coeficiente equivalente (C_q) de la Ecuación 32.

$$C_q = \frac{C_c}{\sqrt{\left(\frac{C_c a}{y_1} + 1\right)}} \quad [32]$$

Se reemplaza el coeficiente equivalente (C_q) en la Ecuación 31, dando como resultado la Ecuación 33. que describe el caudal en función de la apertura de la compuerta (a) y el nivel hidráulico (y_1).

$$Q = C_q \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2gy_1} \quad [33]$$

El cálculo del resalto hidráulico a la salida de la compuerta se determina a partir del nivel hidráulico (y_2) y el nivel hidráulico posterior al resalto (y_3), como se puede observar en la **Figura 18**.

Conociendo una de las alturas ($y_2 = C_c a$) se puede conocer el nivel hidráulico posterior al resalto (y_3).

$$\frac{y_2}{y_3} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1 \right) \quad [34]$$

$$\frac{y_3}{y_2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad [35]$$

La Ecuación 36, determina la pérdida de carga (Δh_r)

$$\Delta h_r = \frac{1}{4} \frac{(y_2 - y_1)^3}{y_1 - y_2} \quad [36]$$

Posteriormente para determinar la longitud del resalto (L), mediante la Ecuación 37 de Bakhemetteff o la Ecuación 38 de F.J. Domínguez.

$$L = 4,5 \frac{y_2}{y_c} \quad [37]$$

$$\frac{L}{y_c} = 18 - 20 \frac{y_1}{y_c} \quad [38]$$

Finalmente, el nivel hidráulico crítico (y_c) se puede calcular desde la Ecuación 39.

$$y_c = \frac{(Q/b)^{2/3}}{\sqrt[3]{g}} \quad [39]$$



5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Modelo Numérico

La función de las Ecuaciones de Hooghoudt y Ernst tiene como objetivo diseñar el largo entre drenes para un predio sin intervención. Por lo que la existencia de canales de drenaje en las Vegas Magallánicas tuvo como consecuencia la modificación de las ecuaciones, teniendo como objetivo la determinación del nivel hidráulico del canal, variando los diferentes largos entre canales preexistentes como se pueden apreciar en las líneas amarillas en la **Figura 19**.



Figura 19. Área de estudio, canales del sistema de drenaje (líneas azules), longitud entre canales de drenaje (amarillo), delimitación del área de estudio (polígono rojo), sensores de nivel freático (S3, S4, S5 y S6) y calicatas (C3, C4 y C5). Fuente: Elaboración propia.

5.1.1 Ecuación de Hooghoudt

La Ecuación de Hooghoudt se modeló en el software MATLAB. Se consideró en una primera instancia la caracterización del perfil de suelo, se definió una recarga superficial diaria como $0,00134 \text{ m día}^{-1}$ que corresponde a la mayor recarga superficial del mes de abril del 2019 (**Tabla 3**) y un promedio de conductividad hidráulica para el perfil de $2,6 \text{ m día}^{-1}$. Se determinó desde el área de estudio que el máximo largo entre drenes existentes es de 76 m y el mínimo 10 m, por lo que se definió un rango de evaluación desde los 10 m hasta los 80 m de largo entre drenes. En la **Figura 20** se puede observar la variación del nivel hidráulico en función del largo entre drenes y la Ecuación 40, muestra la modelación de la curva asociada a la Ecuación de Hooghoudt.

$$y = 0,0001L^2 + 0,0048L + 0,7425 \quad [40]$$

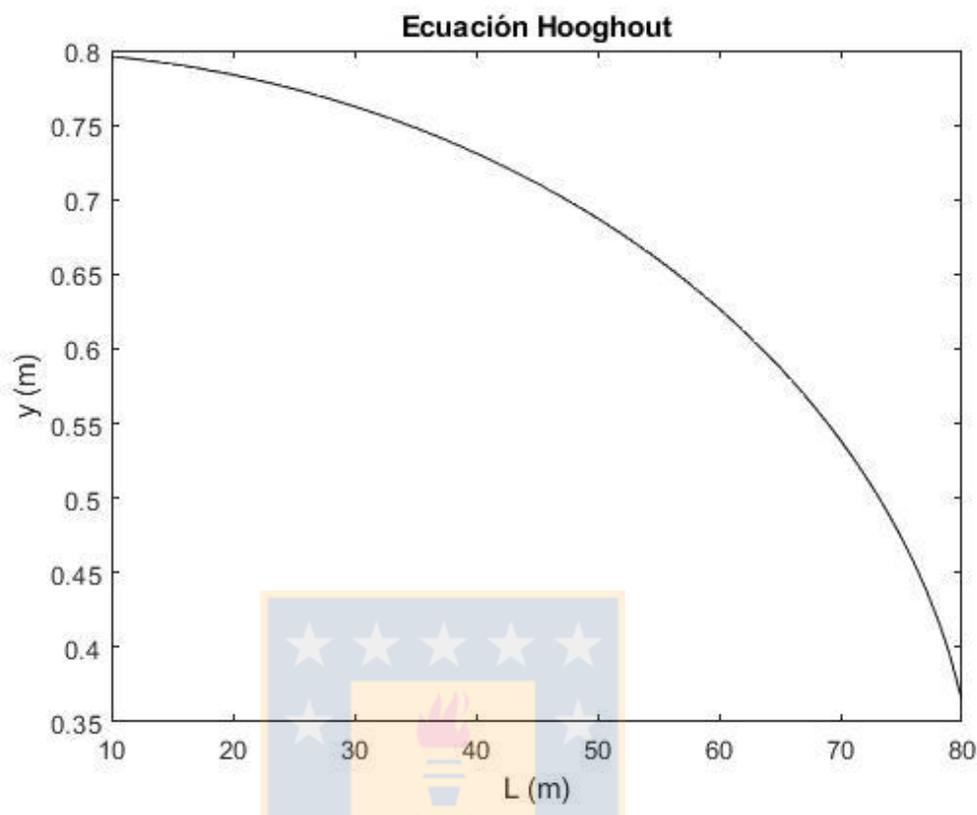


Figura 20. Variación del nivel hidráulico (y) para el perfil transversal del canal de drenaje en función de diferentes largos entre drenes (L). Fuente: Elaboración propia.

Al evaluar la relación entre el nivel hidráulico en función del nivel freático recomendado, la Ecuación de Hooghoudt posee limitaciones en cuanto a que el máximo largo entre drenes que puede modelar, que oscila entre los 10 hasta los 60 metros, posterior a dicho largo la Ecuación 10 ofrece soluciones dentro del conjunto de los números complejos, esto se debe a que la componente numérica que se observa en la Ecuación 41 da como resultado una componente negativa, como la función que modela el nivel hidráulico en función del largo entre drenes entre mayor sea esta longitud se incrementará

la recarga por el cuadrado del largo (RL^2) en comparativa a la componente que describe el movimiento de agua por el perfil de suelo ($4KH^2$) ocasionando una componente negativa y en consecuencia que el modelo solo sea aplicable en cierto rango de largo entre drenes como se puede observar en la **Figura 21**.

$$(4KH^2 - RL^2)$$

[41]

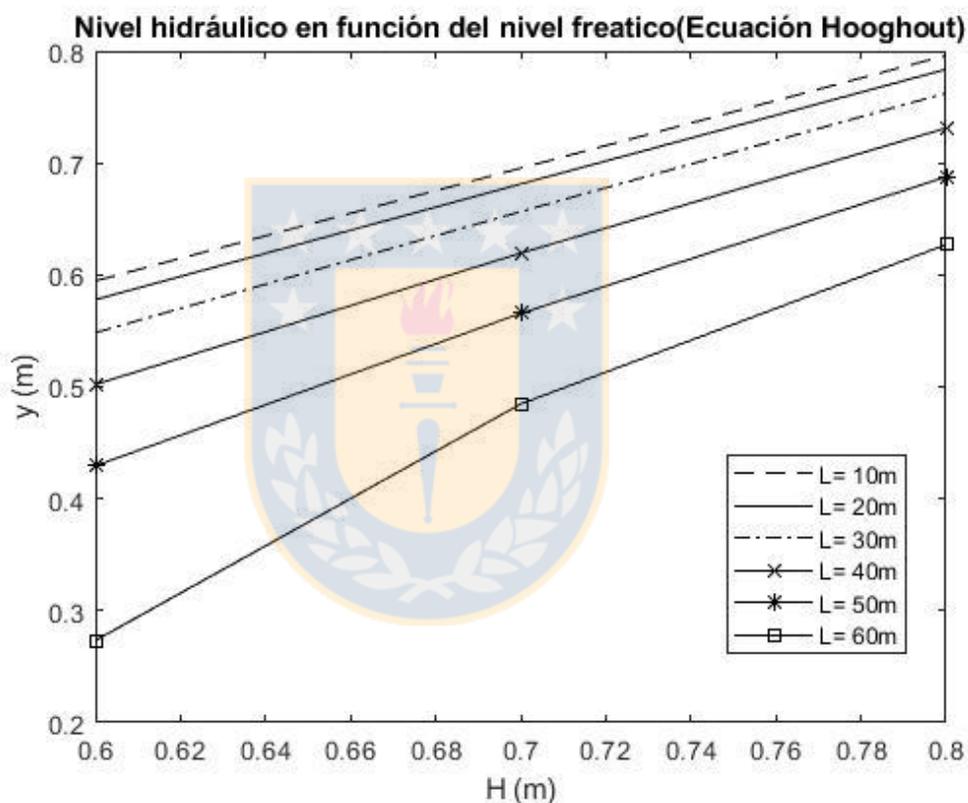


Figura 21. Nivel hidráulico (y) en función del nivel freático recomendado (H) para diferentes largos entre drenes(L). Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones que están representadas en la **Figura 21**, desde los 10 hasta los 60 m de largo se presentan en el Anexo **A** desde la Ecuación **46** hasta la Ecuación **51**.

5.1.2 Ecuación de Ernst

Similarmente, se modeló en del software MATLAB, donde se definió una recarga superficial diaria como $0,00134 \text{ m día}^{-1}$, en el caso particular de la Ecuación de Ernst se describió el perfil de suelo en 2 estratas. La primera con una conductividad hidráulica de $2,8 \text{ m día}^{-1}$ y un espesor superior de 0,3 m, considerando el nivel freático recomendado y que en esta estrata es donde ocurre flujo vertical. La segunda estrata con una conductividad hidráulica de $1,9 \text{ m día}^{-1}$ y un espesor superior de 0,5 m, considerando que en esta estrata es donde ocurre flujo horizontal y radial. Sin embargo, los resultados presentados en la **Figura 22** y **Figura 23** consideran el flujo radial, esta componente se evaluará en el análisis de sensibilidad posteriormente.

Se consideró un rango de evaluación desde los 10 hasta los 80 m de largo entre drenes, no obstante, la ecuación de Ernst tiene la particularidad de modelar desde 1 m de distancia entre drenes como se puede observar en la **Figura 22** donde se aprecia la variación del nivel hidráulico en función del largo entre drenes. La Ecuación 42 muestra la modelación de la curva asociada a la Ecuación de Ernst.

$$-0,00009L^2 + 0,0015L + 0,799 \quad [42]$$

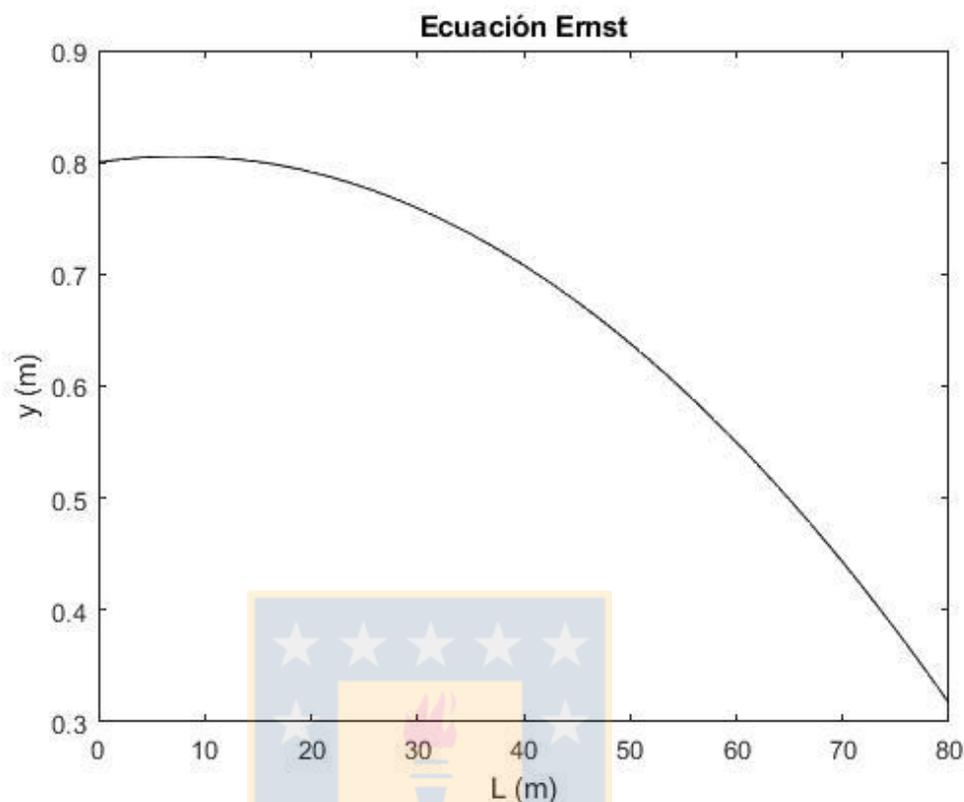


Figura 22. Variación del nivel hidráulico (y) para el perfil transversal del canal de drenaje en función de diferentes largos entre drenes (L). Fuente: Elaboración propia.

Al evaluar la relación entre el nivel hidráulico en función del nivel freático recomendado, la Ecuación de Ernst no posee limitaciones en cuanto a que el máximo largo entre drenes, que oscila entre 10 hasta los 80 m, como se puede observar en la **Figura 23** y las ecuaciones que modelan cada una de ellas se encuentran en el Anexo **A** desde la Ecuación 52 hasta la Ecuación 59.

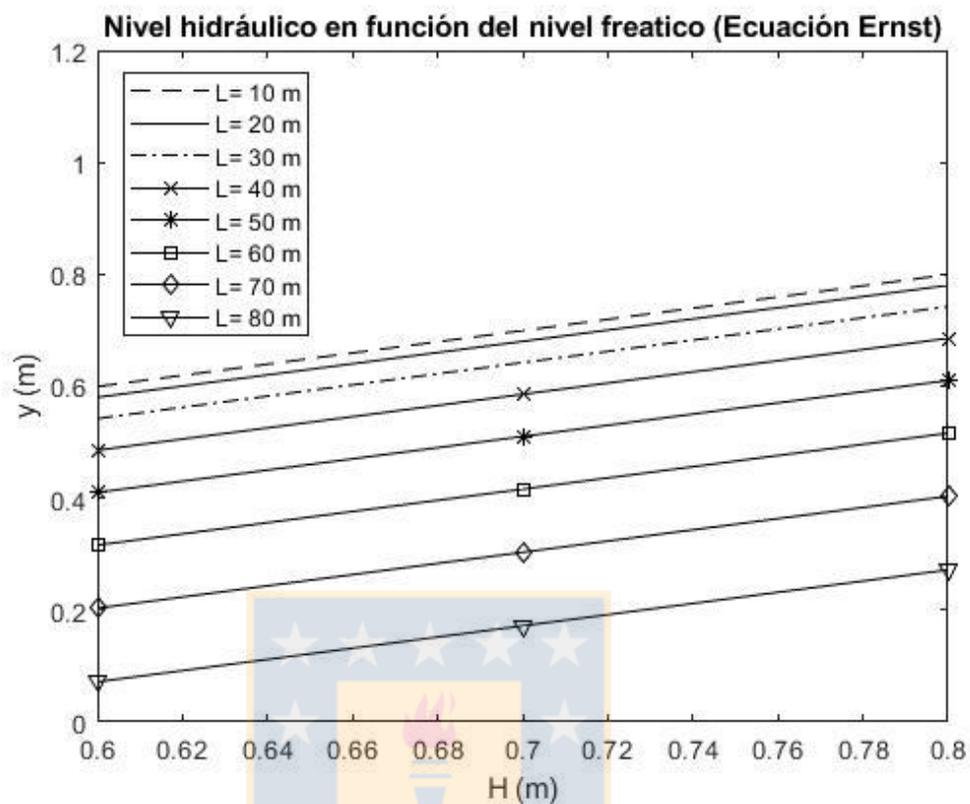


Figura 23. Nivel hidráulico (y) en función del nivel freático recomendado (H) para diferentes largos entre drenes (L). Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 Análisis de sensibilidad flujo radial

Se analizó la componente del flujo radial de la Ecuación de Ernst (Ecuación 19), donde se considera que en la segunda estrata es donde ocurre flujo horizontal y radial. La componente del flujo radial (Ecuación 14) donde el coeficiente de resistencia radial (W_r) posee un valor de -1,08, considerando que el flujo radial ocurre en la segunda estrata (**Figura 14**), se comparó la variación del nivel hidráulico (y) en función de diferentes largos entre drenes (L), donde se puede apreciar en la **Figura 24** que entre mayor sea la distancia entre drenes más relevancia toma el componente del flujo radial.

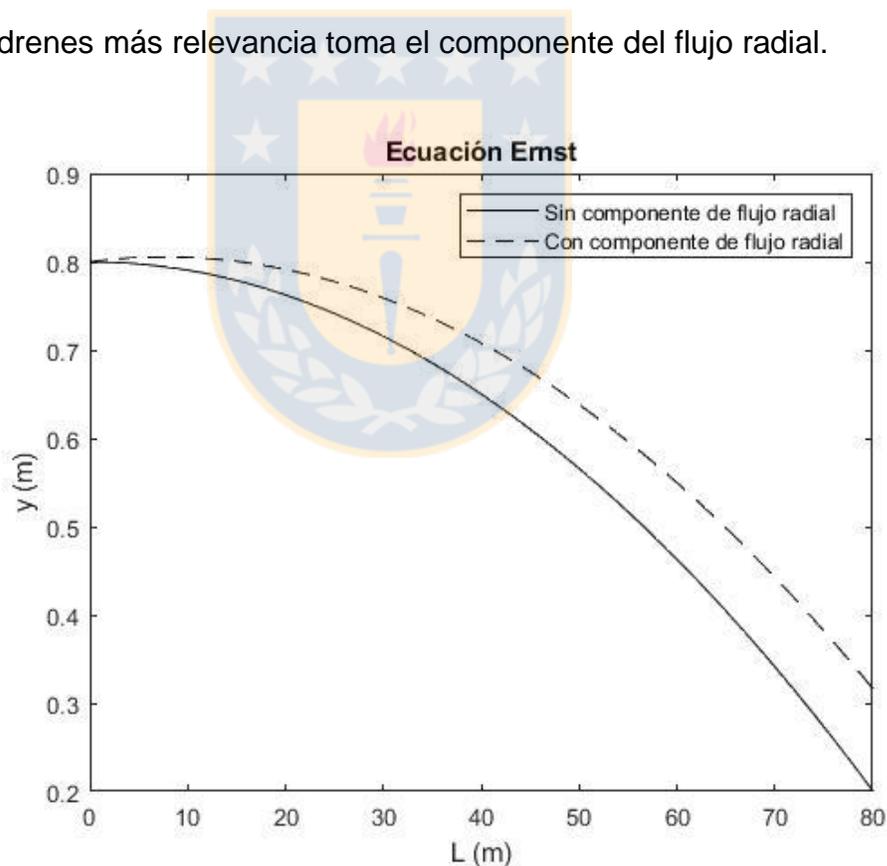


Figura 24. Comparación de la variación del nivel hidráulico (y) para el perfil transversal del canal de drenaje en función de diferentes largos entre drenes (L), con y sin componente radial. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Funcionamiento del sistema de drenaje preexistente

Se evaluó el estado actual de las Vegas Magallánicas, mediante los datos de topografía y nivel freático del Boletín (Ivelic-Saez et al., 2021), desde las sondas S3, S6, S4 y S5 respectivamente, que por su ubicación muestran un perfil longitudinal de la variación del nivel freático a lo largo de la Vega y como resultado la fluctuación del nivel freático para los meses del 2021 (Tabla 4).

Tabla 4. Diferencia entre nivel topográfico y nivel freático (D.F) para las sondas (S3, S6, S4 y S5). Fuente: Elaboración propia.

Mes	D.F (m)			
	S3	S6	S4	S5
Abril	1,05	1,15	0,95	0,70
Mayo	0,85	0,95	0,75	0,50
Junio	0,75	0,85	0,70	0,45
Julio	0,55	0,75	0,65	0,40
Agosto	0,65	0,85	0,65	0,50
Septiembre	0,75	0,95	0,65	0,50
Octubre	0,80	1,05	0,70	0,60
Noviembre	0,95	1,15	0,75	0,70
Diciembre	1,05	1,25	0,85	0,80
Enero	1,25	1,40	1,15	1,00
Febrero	1,35	1,45	1,25	1,00
Marzo	1,25	1,35	1,25	0,90
Abril	1,15	1,25	1,15	0,80
Mayo	1,05	1,15	0,85	0,50

Como se puede apreciar en la Tabla 4, el nivel freático se encuentra en promedio a un 1 m de profundidad, fluctuando a valores mínimos de 0,45 hasta los 1,45 m de profundidad, cumpliendo la función de drenar la Vega lo que ocasiona la pérdida de la estructura de suelo (**Figura 1**), así como un grave déficit hídrico en la Vega Magallánica.

Posteriormente se comparó el nivel freático actual versus la profundidad del nivel freático mínimo recomendado ($Z = 0,4 \text{ m}$) (véase Ecuación 20 y **Figura 17**), obteniendo esta diferencia se puede inferir la altura de agua a reponer en la Vega Magallánica para un mejor desarrollo de praderas y conservación tanto de la estructura de suelo como de los ecosistemas asociados (Tabla 5).

Tabla 5. Diferencia del nivel topográfico y nivel freático (D.F) y la profundidad del nivel freático mínimo recomendado (Z) para las sondas (S3, S6, S4 y S5). Fuente: Elaboración propia.

Mes	D.F – Z (m)			
	S3	S6	S4	S5
Abril	0,65	0,75	0,55	0,30
Mayo	0,45	0,55	0,35	0,10
Junio	0,35	0,45	0,30	0,05
Julio	0,15	0,35	0,25	0,00
Agosto	0,25	0,45	0,25	0,10
Septiembre	0,35	0,55	0,25	0,10
Octubre	0,40	0,65	0,30	0,20
Noviembre	0,55	0,75	0,35	0,30
Diciembre	0,65	0,85	0,45	0,40
Enero	0,85	1,00	0,75	0,60
Febrero	0,95	1,05	0,85	0,60
Marzo	0,85	0,95	0,85	0,50
Abril	0,75	0,85	0,75	0,40
Mayo	0,65	0,75	0,45	0,10

Cómo se puede apreciar en la Tabla 5, la altura de agua a reponer hasta un nivel freático recomendado oscila entre los 0,1 hasta 1,0 m en el perfil de suelo. Por lo que se puede inferir que solo tomando en consideración el balance de la recarga superficial tomaría un aproximado de 10 años en recuperarse. Cabe mencionar que no se consideran recargas de aguas subterráneas o por los laterales de la Vega.

Se analizó adicionalmente la variación del nivel freático a lo largo de la Vega Magallánica desde el sensor S3 ubicado al inicio de la Vega hasta el sensor S5 (**Figura 19**). Se obtuvo esta variación del nivel freático a lo largo de la vega magallánica para cada mes desde abril del 2019 hasta mayo 2020 (véase Anexo B), dando como resultado el mes de julio y febrero con un máximo y mínimo del nivel freático respectivamente, esto se condice con los meses de mayor precipitación y evapotranspiración.

En la **Figura 25**, se muestra la variación del nivel freático en los meses de julio y febrero, dando una diferencia promedio anual de 0,8 m. Además, se observa una disminución del nivel freático entre los sensores S3, S6 hasta S4, siendo este sector el más afectado, recuperándose en los sensores S4 hasta S5 manteniendo un nivel freático relativamente constante.

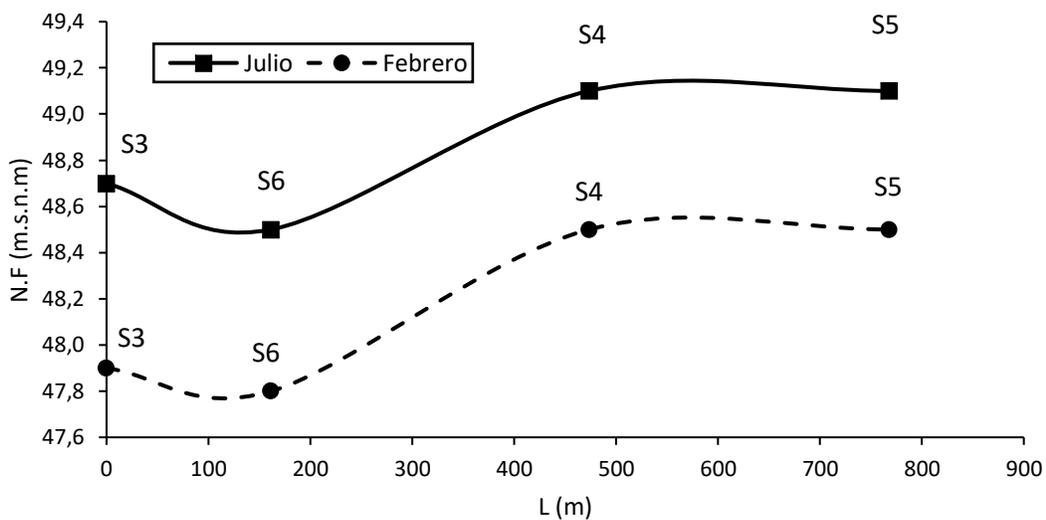
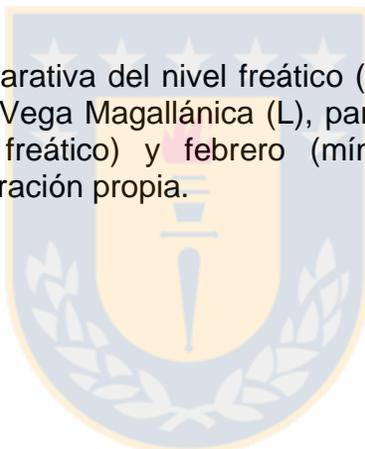


Figura 25. Comparativa del nivel freático (N.F) en función de la longitud de la Vega Magallánica (L), para los meses de julio (máximo nivel freático) y febrero (mínimo nivel freático). Fuente: Elaboración propia.



5.3 Funcionamiento del sistema de drenaje con mejoras

Con el conocimiento del estado actual de las Vegas y la variación del nivel freático durante un periodo de 12 meses mencionado en el capítulo anterior, se evaluaron diferentes propuestas para el mejoramiento del estado actual de las Vegas Magallánicas.

5.3.1 Propuesta sistema de drenaje subterráneo

Se evaluó la posibilidad de modificar los canales de drenaje preexistentes por un sistema subterráneo, con la implementación de un dren francés y un sistema de control automatizado. Las ventajas de esta propuesta es el control diario del nivel freático y el mínimo impacto sobre la vega, sin embargo, posee limitantes como el costo asociado a la implementación y materiales de relleno necesarios para el sistema subterráneo (Figura 26).



Figura 26. Compuerta de control del nivel freático con un sistema electrónico y perfil de un dren francés. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 Propuesta sistema de drenaje superficial – subterráneo

Se evaluó la posibilidad de implementar un sistema híbrido (superficial-subterráneo), con la ejecución de laterales subterráneos y conservación de los canales de drenaje superficiales incorporando compuertas verticales. Si bien esta propuesta es un sistema comúnmente utilizado, posee varias desventajas como lo invasivo para la estructura de suelo que significaría la implementación de laterales subterráneos en la Vega Magallánica (Figura 27).

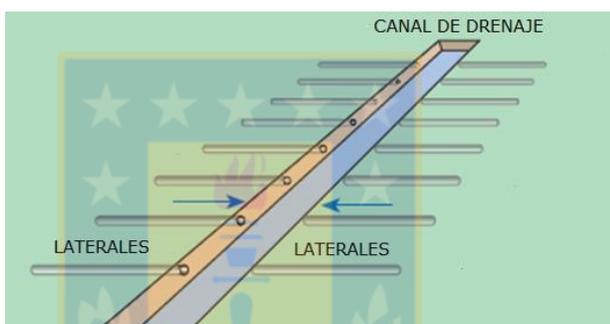


Figura 27. Sistema de drenaje híbrido (superficial- subterráneo). Fuente: Elaboración propia en base a Salgado (2000).

5.3.3 Propuesta sistema de drenaje superficial

Por último, se evaluó mantener un sistema de drenaje superficial y con la instalación de compuertas verticales que cumplen la función de controlar el nivel hidráulico, las principales ventajas de esta propuesta en comparación a las anteriores es la menor intervención y costo de implementación en la Vega Magallánica, cumpliendo con el objetivo de mantener un nivel freático recomendado. En los siguientes capítulos se profundizará en la propuesta de un sistema de drenaje superficial con compuertas verticales.

5.3.4 Compuertas verticales

Una vez definida la propuesta de mejora, se dispone a determinar las ubicaciones de las compuertas en el área de estudio. Como se puede observar en la **Figura 28**, existe un drenaje principal que atraviesa toda la Vega de aproximadamente 1010 m (línea amarilla), donde se definió una puerta de entrada y de salida (compuerta 1 y 6, respectivamente), así como 4 compuertas de control de nivel hidráulico (compuertas 2, 3, 4 y 5), considerando la ubicación de las compuertas como puntos estratégicos a lo largo del canal de drenaje principal (Tabla 6), donde la Ecuación de Ernst podría ser aplicable con una distancia moderada al canal de drenaje más cercano (línea azul), mostrándose la longitud entre drenes con línea verde en la Figura 28.



Figura 28. Ubicación de compuertas verticales (puntos celestes) en el canal de drenaje principal (línea amarilla), canales de drenaje secundarios (línea azul) y distancia entre drenes (línea verde). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Posición de la compuerta a lo largo del canal de drenaje principal (P), longitud entre el canal de drenaje principal al canal de drenaje más cercano (L). Fuente: Elaboración propia.

N° compuerta	P (m)	L (m)
1	0	42
2	215	55
3	395	42
4	585	70
5	850	70
6	1010	-

Mientras que las compuertas 1 y 6 cumplen la función de entrada y salida del flujo de agua, las compuertas 2, 3, 4 y 5 cumplen la función del control del nivel hidráulico en el canal de drenaje principal, por lo que se ha diseñado una marca que delimita si el nivel hidráulico es insuficiente, está en un rango recomendado, o si excede dicho nivel, la descripción se muestra en la Tabla 7, y una representación gráfica de la compuerta con la etiqueta en la Figura 29 y Figura 30.

Tabla 7. Descripción de la marca de nivel hidráulico para el canal de drenaje principal. Fuente: Elaboración propia.

Color	Acción a realizar	Descripción
Amarillo	Abrir compuerta	El color amarillo indica que el nivel freático en la vega se encuentra sobre el nivel freático recomendado, por lo que se aconseja abrir la compuerta hasta llegar a los parámetros recomendados.
Verde	Mantener compuerta cerrada	El color verde indica que el nivel freático en la Vega se encuentra dentro de los límites recomendados, mostrándose a través del nivel hidráulico del canal.
Rojo	Mantener compuerta cerrada	El color rojo indica que el nivel freático se encuentra bajo el límite recomendado, por lo que se aconseja mantener la compuerta cerrada y esperar hasta un nivel hidráulico dentro de los parámetros recomendados.

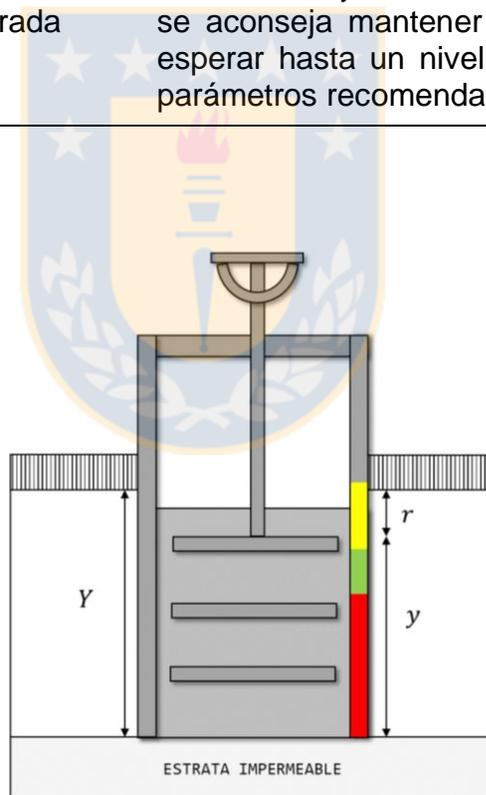


Figura 29. Representación del perfil transversal del canal de drenaje principal. Fuente: Elaboración propia.

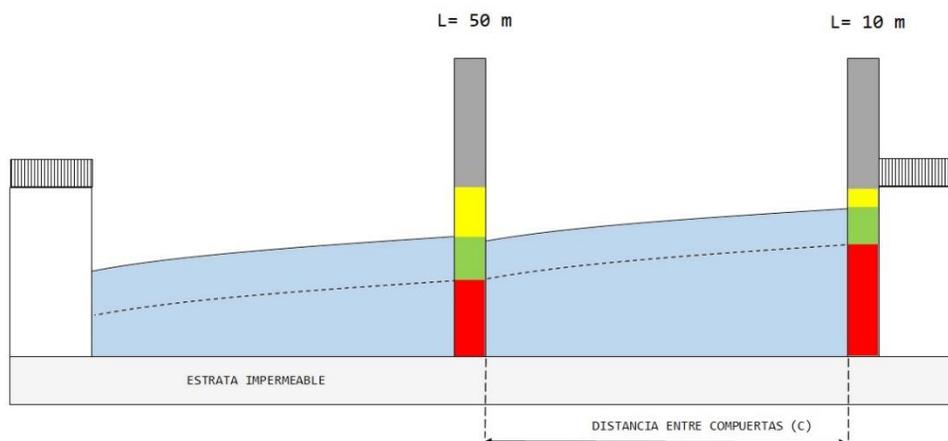


Figura 30. Representación del Perfil longitudinal del canal de drenaje principal. Fuente: Elaboración propia.

Las marcas presentes en las compuertas presentaran un rango de nivel hidráulico recomendado de color verde en la Tabla 8, se muestran los rangos recomendados para cada compuerta.

Tabla 8. Nivel hidráulico recomendado (y) para un rango de nivel freático recomendado de 0,6 hasta 0,8 m, longitud entre el canal de drenaje principal al canal de drenaje más cercano (L). Fuente: Elaboración propia.

N° compuerta	L (m)	y (m)
1	42	0,63 – 0,43
2	55	0,51 – 0,32
3	42	0,63 – 0,43
4	70	0,35 – 0,15
5	70	0,35 – 0,15
6	-	No aplica

Los resultados presentados anteriormente son en base a una sección estándar (Figura 16), a lo largo de todo el canal de drenaje principal, no se consideran variaciones de profundidad del canal, o una pendiente variable entre compuertas.

Por las condiciones de la pandemia del COVID 19, no se tuvo la oportunidad de tomar datos en terreno para verificar el modelo, por lo que solamente es una aproximación en base a la información obtenida desde el Boletín N° 435 del INIA.



6. CONCLUSIONES

El modelo matemático aplicado mediante la Ecuación de Ernst se ajustó de buena forma modelando el sistema de drenaje para una mayor amplitud de largo entre drenes, variando de los 10 hasta los 80 m, en comparativa a la Ecuación de Hooghoudt que solo se ajustó hasta los 60 m. La Ecuación de Ernst a su vez tiene la particularidad de estratificar el suelo, y adecuarlo a un perfil más representativo a la Vega Magallánica, además de cumplir con el máximo largo entre drenes existente en ella.

Como propuesta de solución inmediata se recomienda la instalación de compuertas verticales en el sistema de drenaje, las cuales tendrán como función controlar el nivel hidráulico del canal de drenaje y a su vez el nivel freático recomendado para un buen desarrollo de la vegetación existente en la Vega. Se estima que los primeros años las compuertas tendrán la función de recuperación para posteriormente cumplir la función de control del nivel freático en la Vega.

Es importante destacar que, en base a los datos obtenidos en las modelaciones realizadas, se puede complementar posteriormente con un nuevo estudio la incorporación de nuevas tecnologías, como energía fotovoltaica, sensores y automatización del control del nivel hidráulico, en donde se pueda caracterizar de mejor manera el aporte de las aguas subterráneas y desde laderas de la Vega Magallánica.

7. LITERATURA CITADA

1. Domínguez, E., C. Pérez, A. Suárez, R. Lira, J. Ivelic-Sáez y J. de la Fuente. 2019. Manual para estimar la cantidad de forraje disponible en pastizales naturales: una herramienta necesaria para un uso racional de estos ecosistemas. Boletín INIA N°401. INIA Kampenaike. Punta Arenas, Chile.
2. Ivelic-Saez, J., J. Dörner, J.L. Arumí, L. Cisternas, J. Valenzuela, E. Muñoz, R. Clasing, S. Valle, S. Radic, H. Alonso, R. López, H. Uribe, R. Muñoz, I. Ordoñez y J. Carrasco. 2021. Balance hídrico de humedales de uso agropecuario: El primer paso para el mejoramiento en la gestión hídrica a nivel predial en Magallanes. Una investigación multidisciplinaria. Boletín INIA N°435. INIA Kampenaike. Punta Arenas, Chile.
3. Movia, C. 1984. Tipología de mallines. En: J. Rabassa, A. Brandani, O. Capua y E. Ottonello (Eds.). Curso de campo en sistemas ecogeomorfológicos: Guía de excursiones. Universidad Nacional del Comahue. Departamento de Postgrado. Neuquén, Argentina.
4. Reynolds, W.D., B.T. Bowman, C.F. Drury, C.S. Tan and X. Lu. 2002. Indicators of good soil physical quality: Density and storage parameters. *Geoderma* 110(1): 131-146.
5. Reynolds, W.D., C.F. Drury, X.M. Yang and C.S. Tan. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma* 146(3-4): 466-474.
6. Salgado, L.G. 2000. Manual de estándares técnicos y económicos para obras de drenaje. CNR. Universidad de Concepción. Santiago, Chile.
7. Santibáñez, F., P. Santibáñez, C. Caroca y P. González. 2017. Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo VI: regiones de Aysén y Magallanes. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. AGRIMED. Santiago, Chile.
8. Ternicien, M.C. 2017. Eficiencia de la administración del recurso hídrico en el riego a través de la automatización de compuertas en canales. Memoria de titulación, Construcción Civil. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles. Valparaíso, Chile.
9. Vuletín, A. 1979. Neuquén. Fauna. Flora. Riquezas naturales. Toponómico. Guía turística. Siringa Libros. Neuquén, Argentina.

1. ANEXOS

8.1 Anexo A. Ecuaciones complementarias

Funciones para el cálculo del coeficiente de contracción (C_c).

$$C_c = 0,6687 \left(\frac{y_1}{a}\right)^{-0,0425} \quad \text{con } 3,5 \leq \frac{y_1}{a} \quad [43]$$

$$C_c = -0,0554 \ln \left(\frac{y_1}{a}\right) + 0,7033 \quad \text{con } 2,0 < \frac{y_1}{a} < 3,5 \quad [44]$$

$$C_c = 0,3543 \left(\frac{y_1}{a}\right)^2 - 1,3869 \left(\frac{y_1}{a}\right) + 2,0329 \quad \text{con } 1,0 \leq \frac{y_1}{a} \leq 2,0 \quad [45]$$

Las ecuaciones que están representadas en la **Figura 21** para la Ecuación de Hooghoudt, desde los 10 hasta los 60 metros de largo.

$$y = 1,0068H - 0,0095 \quad [46]$$

$$y = 1,0286H - 0,0391 \quad [47]$$

$$y = 1,0704H - 0,1834 \quad [48]$$

$$y = 1,1446H - 0,183 \quad [49]$$

$$y = 1,2884H - 0,3402 \quad [50]$$

$$y = 1,744H - 0,7534 \quad [51]$$

Las ecuaciones que están representadas en la **Figura 23**, para desde los 10 hasta los 80 metros de largo.

$$y = H + 0,005 \quad [52]$$

$$y = H - 0,0086 \quad [53]$$

$$y = H - 0,0409 \quad [54]$$

$$y = H - 0,092 \quad [55]$$

$$y = H - 0,1619 \quad [56]$$

$$y = H - 0,2505 \quad [57]$$

$$y = H - 0,3579 \quad [58]$$

$$y = H - 0,4811 \quad [59]$$

8.2 Anexo B. Figuras complementarias de las modelaciones realizadas.

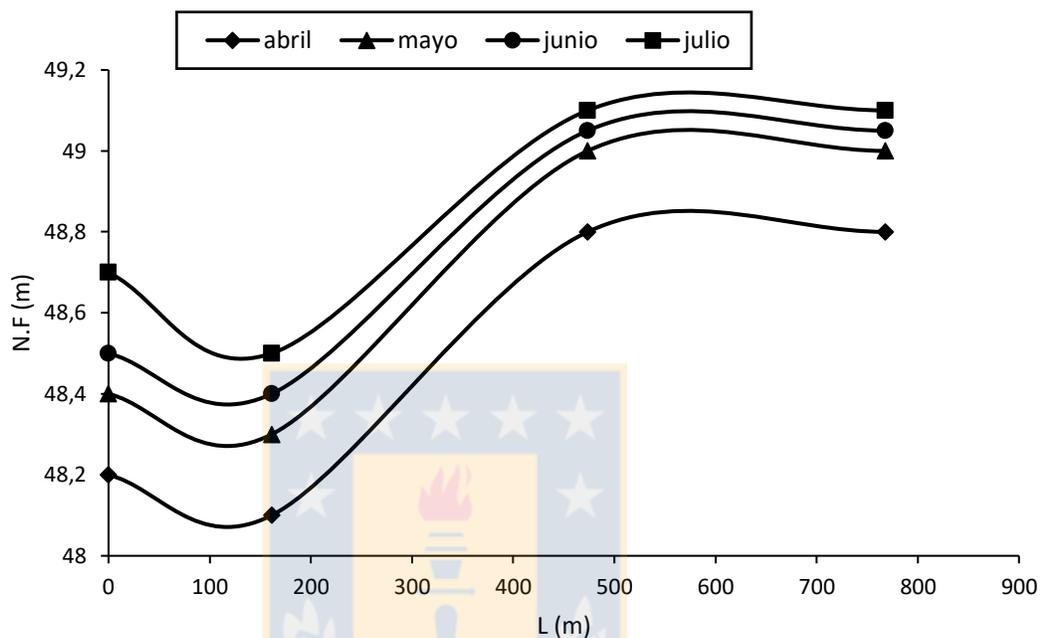


Figura 31. Comparativa del nivel freático (N.F) en función de la longitud de la Vega Magallánica (L), para los meses de abril, mayo, junio y julio del año 2019. Fuente: Elaboración propia.

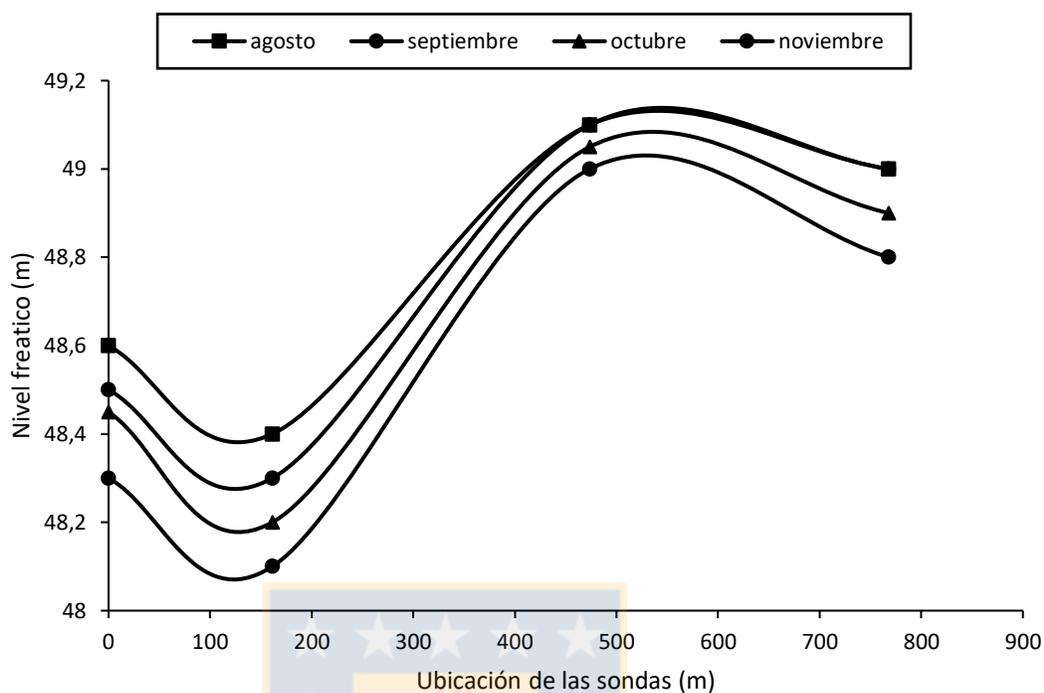


Figura 32. Comparativa del nivel freático (N.F) en función de la longitud de la Vega Magallánica (L), para los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre del año 2019. Fuente: Elaboración propia.

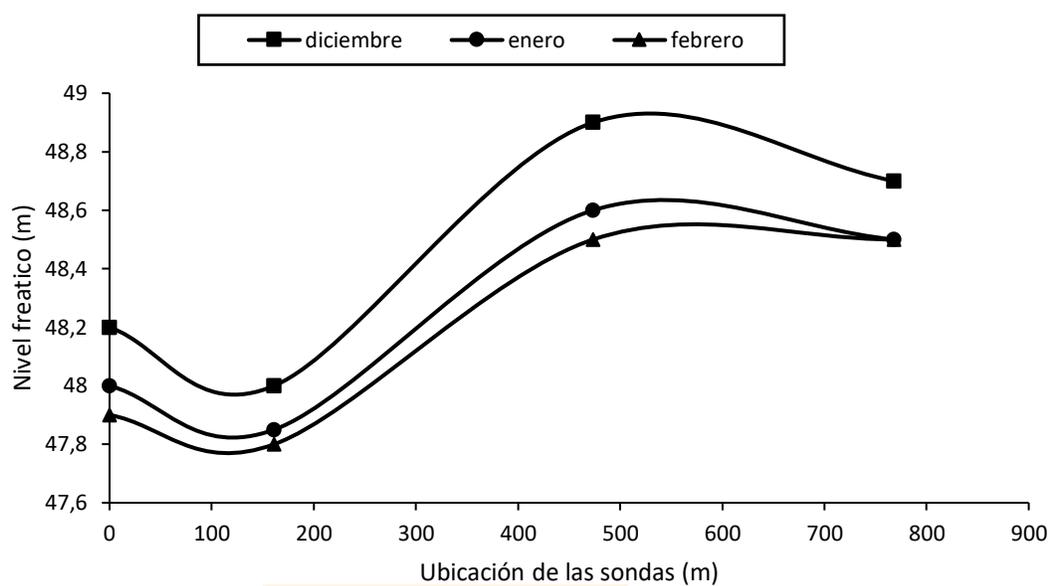


Figura 33. Comparativa del nivel freático (N.F) en función de la longitud de la Vega Magallánica (L), para los meses de diciembre del 2019, enero y febrero del año 2020. Fuente: Elaboración propia.

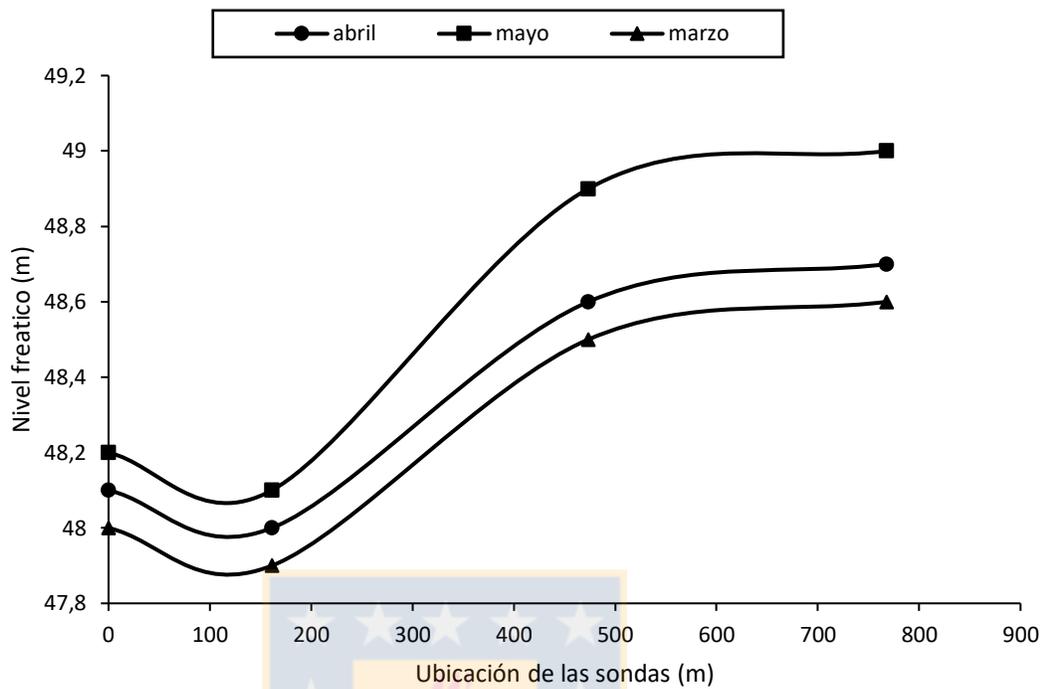


Figura 34. Comparativa del nivel freático (N.F) en función de la longitud de la Vega Magallánica (L), para los meses de abril, mayo y junio del año 2020. Fuente: Elaboración propia.