

Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil



“Caracterización hídrica de la cuenca Estero el Jote en
Quintay mediante instalación de obras de medición y
análisis de demandas en base a imágenes satelitales”

Por

Daniel Fernando Muena Chamorro

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de
la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: David Poblete López
Profesor Correferente: Alejandro Weinstein

Diciembre, 2022

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por el apoyo recibido en este proceso, en especial a mis padres, Marisol y Marco y a mi polola Fernanda.

Agradezco a mis amigos y compañeros de la universidad por el mutuo apoyo, los buenos momentos y el aprendizaje, en especial a Aron, José y Matías.

Quisiera agradecer al cuerpo docente de la universidad y a todos los profesores que han sido parte de mi formación académica.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	12
1. Introducción.....	12
1.1. Escenario	12
1.2. Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH).....	12
1.3. Modelo hidrológico cuenca Estero Casablanca.....	13
1.4. Descripción del problema.....	15
1.5. Objetivo.....	16
1.5.1. Objetivos específicos.....	16
1.6. Alcance del trabajo.....	17
CAPÍTULO II.....	18
2. Revisión bibliográfica	18
2.1. Caracterización hídrica.....	18
2.1.1. Componentes de una cuenca	18
2.1.2. Ordenamiento para su manejo: Regiones hidrológicas	19
2.1.3. Caracterización como unidad hidrográfica de planeación.....	19
2.2. Balance hídrico.....	21
2.2.1. Fuentes de información	22
2.3. Modelación hidrológica.....	22
2.4. Modelo WEAP	23
2.4.1. Métodos de simulación.....	24
2.4.2. Variables y Parámetros involucrados en el modelo WEAP	24
2.5. Sistemas de medición	26
2.5.1. Estación fluviométrica.....	26
2.5.2. Estación pluviométrica.....	27
2.6. Herramientas	28
2.6.1. QGIS	28
2.6.2. GOOGLE EARTH ENGINE	29
2.6.3. ARDUINO	30
2.6.4. Google Earth Pro.....	31
CAPÍTULO III.....	32
3. Descripción de la metodología a utilizar	32
3.1. Balance hídrico.....	32
CAPÍTULO IV	36

4.	Descripción de la Cuenca Estero el Jote.....	36
4.1.	Delimitación de la cuenca Estero el Jote.....	36
4.2.	Parámetros geomorfológicos de la cuenca Estero el Jote.....	37
4.3.	Cobertura de suelo.....	39
4.4.	Clima.....	40
4.4.1.	Fuentes de información.....	40
4.4.2.	Precipitaciones y temperatura.....	42
4.4.3.	Otras forzantes climáticas.....	46
4.5.	Sitos de demanda y sectores de interés.....	48
4.5.1.	Derechos de Agua en la cuenca.....	48
4.5.2.	Humedal El Jote.....	50
CAPÍTULO V.....		60
5.	Obras de medición.....	60
5.1.	Metodología para diseño, construcción e instalación de obra de medición piezométrica 60	
5.1.1.	Propuesta de diseño.....	60
5.1.2.	Metodología de funcionamiento y programación.....	62
5.1.3.	Instalación.....	63
5.1.4.	Resultados.....	65
5.2.	Metodología para diseño, construcción e instalación de obra de medición pluviométrica 66	
5.2.1.	Propuesta de Diseño.....	66
5.2.2.	Metodología de funcionamiento y programación.....	67
5.2.3.	Pruebas de funcionamiento.....	68
5.2.4.	Instalación.....	68
5.2.5.	Resultados.....	70
CAPÍTULO VI.....		71
6.	Demandas de Agua.....	71
6.1.	Demandas de Comité de Agua potable rural del Quintay.....	71
6.1.1.	Población abastecida.....	71
6.1.2.	Dotación.....	72
6.2.	Demandas de Condominio Santa Augusta.....	76
6.2.1.	Agua potable.....	76
6.2.2.	Riego.....	80
6.3.	Demanda empresa Forestal Valparaíso S.A.....	82
6.4.	Caudal ecológico.....	82
6.5.	Demandas Evapotranspirativas por producto PML_V2.....	83

CAPÍTULO VII.....	87
7. Modelo Hidrológico	87
7.1. Elaboración del modelo.....	87
7.1.1. Descripción de elementos.....	87
7.1.2. Método y supuestos considerados	89
7.1.3. Parámetros de uso de suelo	93
7.2. Resultados y validación cualitativa del modelo	95
7.2.1. Demandas Evapotranspirativas	95
7.2.2. Resultados de Humedal el Jote.....	98
7.2.3. Caudales en medidor	103
7.2.4. Resultados de acuífero	104
7.2.5. Balance Hídrico.....	106
7.3. Análisis de resultados.....	107
7.3.1. Análisis de estaciones de medición	107
7.3.2. Análisis de caudales	108
CAPÍTULO VIII	110
8. Conclusiones	110
8.1. Comentarios finales.....	110
8.2. Recomendaciones.....	110
Anexos.....	112
Referencias	114
Linkografía.....	116

Índice de Figuras

Figura 1.1: Modelo hidrológico PEGH Casablanca	13
Figura 1.2: Ubicación geográfica de pozos de monitoreo DGA en cuenca Estero Casablanca	14
Figura 1.3: Estaciones fluviométricas simuladas en Modelo Cuenca Estero Casablanca	15
Figura 1.4: Ubicación geográfica localidad de Quintay, Elaboración propia a partir de imágenes disponibles en Google Earth Pro.	15
Figura 1.5: Ubicación Estero Casablanca y Estero el Jote	16
Figura 2.1: Cuenca hidrográfica	18
Figura 2.2: Longitud de cuenca	19
Figura 2.3: Ilustración Factor de forma de la cuenca	20
Figura 2.4: Modelo WEAP Cuenca Estero Casablanca para “Rio Quintay”	23
Figura 2.5: Elementos hidrológicos considerados en el método Humedad de Suelo en WEAP	24
Figura 2.6: Pluviómetro Manual.	27
Figura 2.7: Esquema del pluviómetro de doble cubeta basculante	28
Figura 2.8: Interfaz software QGIS, Elaboración propia.	29
Figura 2.9: Interfaz Sistema Google Earth Engine	30
Figura 2.10: Placa electrónica Arduino	31
Figura 2.11: Interfaz programa Google Earth Pro, Elaboración propia.	31
Figura 3.1: Entradas y salidas de agua en cuenca Estero el Jote.	32
Figura 3.2: Diagrama de metodología para la obtención del balance hídrico.	33
Figura 4.1: Localidad de Quintay Obtenido desde Google Maps.	36
Figura 4.2 Cuenca Estero el Jote, centroide, red de drenaje y estero el Jote	37
Figura 4.3: Estero el Jote con puntos cada 1 [Km] Elaboración propia.	38
Figura 4.4: Perfil Altimétrico Estero el Jote, Elaboración propia.	39
Figura 4.5: Cobertura de suelo de la cuenca Estero el Jote, Elaboración propia	39
Figura 4.6: Producto grillado desde plataforma CR2MET	41
Figura 4.7: Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas	42
Figura 4.8: Precipitaciones a nivel diario por estación	43
Figura 4.9: Temperatura diaria de modelo PEGH Casablanca	44
Figura 4.10: Climograma entre estaciones meteorológicas	44
Figura 4.11: Climograma para modelo hidrológico.	45
Figura 4.12: diferencia entre precipitaciones de producto grillado y promedio ponderado entre estaciones Casablanca y Lago Peñuelas	46
Figura 4.13: Humedad relativa promedio mensual.	47
Figura 4.14 Velocidad del viento mensual	47
Figura 4.15: Fracción de nubosidad promedio mensual	48
Figura 4.16: Ubicación geográfica de derechos de aguas en la cuenca Estero el Jote.	49

Figura 4.17: Derechos de agua en la cuenca Estero el Jote	49
Figura 4.18: Humedal el Jote.....	50
Figura 4.19: Ubicación de mediciones de secciones transversales en humedal el Jote	51
Figura 4.20: perfiles medidos	53
Figura 4.21: Extrapolación de perfil transversal promedio	54
Figura 4.22: Perfil promedio para humedal el Jote.....	55
Figura 4.23: Ancho y área de sección transversal a partir de perfil promedio.....	55
Figura 4.24: Curva Elevación-Ancho promedio.....	56
Figura 4.25: Curva Elevación-Área de sección transversal	56
Figura 4.26: Ejemplos de imágenes satelitales históricas	57
Figura 4.27: Curva Elevación-Área sección transversal.....	57
Figura 4.28: Curva Elevación-Volumen de almacenamiento	58
Figura 4.29: Volúmenes de almacenamiento observados.....	59
Figura 5.1: Esquema de diseño para estación piezométrica	60
Figura 5.2: Sensor de presión de agua, imagen obtenida desde descripción de producto en página web Aliexpress.....	61
Figura 5.3: Placa electrónica Arduino y Datalogger utilizados, elaboración propia.....	61
Figura 5.4: Prueba de funcionamiento de sensor de presión de agua y extensión del cable.....	62
Figura 5.5: Grafico de prueba de funcionamiento.	63
Figura 5.6: Piezómetro instalado en Estero el Jote.....	64
Figura 5.7: Ubicación geográfica de Estación piezométrica	64
Figura 5.8: Recta de funcionamiento relación salida ADC y profundidad	65
Figura 5.9 Resultados de mediciones de estación piezométrica	65
Figura 5.10: Componentes del sistema pluviométrico.....	66
Figura 5.11: Pluviómetro impreso en 3D	67
Figura 5.12: Reporte de registros del pluviómetro	68
Figura 5.13: Pluviómetro instalado en oficinas SSR Quintay	69
Figura 5.14: Ubicación geográfica de Estación pluviométrica.....	69
Figura 5.15: Caja impermeable con pluviómetro integrado	70
Figura 5.16: Resultados pluviómetro.....	70
Figura 6.1: Grafico de población entre 1992 y 2017 para Quintay.....	72
Figura 6.2: Regresión y proyección de población 1980-2020	72
Figura 6.3: Variación mensual Abastecimiento SSR.....	74
Figura 6.4: Demanda hídrica de SSR Quintay.....	75
Figura 6.5: tipos de viviendas en Santa Augusta	76
Figura 6.6: Vista en planta de viviendas en Santa Augusta.....	77
Figura 6.7: Nivel de ocupación semanal en condominio Santa Augusta	78

Figura 6.8: Demanda de agua potable semanal en condominio Santa Augusta.....	78
Figura 6.9: Cambio N°1 producto de urbanización en Santa Augusta	79
Figura 6.10: Cambio N°2 producto de urbanización en Santa Augusta	79
Figura 6.11: Demanda anual promedio en santa augusta por década	80
Figura 6.12: Limites de Santa Augusta, en rojo se muestra el límite del terreno y en azul las áreas de riego..	80
Figura 6.13: Demandas de agua en Santa Augusta.....	81
Figura 6.14: Área de plantaciones forestales desde modelo PEGH Casablanca.....	82
Figura 6.15: Caudal ecológico.....	83
Figura 6.16: Comparación ET entre producto PML_v2 y Estación Casablanca	84
Figura 6.17: Cuenca en Google Earth Engine y obtención de producto PML_V2, Elaboración propia.	85
Figura 6.18: ET real anual PML_V2	85
Figura 6.19: ET real promedio por producto PML_V2	86
Figura 7.1: Modelo hidrológico para cuenca Estero el Jote.....	87
Figura 7.2: Caudal desde nodo a Humedal el Jote.....	90
Figura 7.3: Curva elevación-Volumen ingresada al modelo	90
Figura 7.4: Evaporación neta de humedal ingresada al modelo	91
Figura 7.5: Demanda ficticia de sitio “mar” ingresada al modelo	92
Figura 7.6: Unidades hidrológicas de modelo PEGH Casablanca consideradas en el modelo hidrológico	93
Figura 7.7: Superficie por tipo de suelo en el modelo	94
Figura 7.8: Factor de resistencia a la escorrentía.....	94
Figura 7.9: Evaporación por unidad hidrológica (1980-2020)	96
Figura 7.10: Evapotranspiración semanal promedio por unidad hidrológica	96
Figura 7.11: Evapotranspiración total en la cuenca modelada vs PML_V2	97
Figura 7.12: Evapotranspiración semanal promedio en la cuenca modelada vs PML_v2.....	97
Figura 7.13: Volumen en humedal el Jote (2008-2020)	98
Figura 7.14: Volumen semanal promedio en humedal el Jote.....	98
Figura 7.15: Elevación en humedal el Jote (2008-2020).....	99
Figura 7.16: Elevación semanal promedio en humedal el Jote.....	99
Figura 7.17: Caudal desde nodo a Acuífero y a Humedal el Jote.....	100
Figura 7.18: Caudales afluentes y efluentes a humedal el Jote.....	101
Figura 7.19: Promedio semanal caudales afluentes y efluentes a humedal el Jote	101
Figura 7.20: Evaporación neta humedal el Jote.....	102
Figura 7.21: Evaporación neta promedio semanal de humedal el Jote	102
Figura 7.22: Comparación anual entre caudal modelado y caudal VIC	103
Figura 7.23: Comparación semanal promedio entre caudal modelado y caudal VIC.....	103
Figura 7.24 Nivel de almacenamiento en acuífero 1980-2020.....	104
Figura 7.25: Nivel promedio semanal de almacenamiento en acuífero	105

Figura 7.26: Caudal afluente hacia sitio “mar” 1980-2019	105
Figura 7.27: Balance hídrico anual en la cuenca	106
Figura 7.28: Balance hídrico promedio semanal en la cuenca.....	106
Figura 7.29: Cambios de posición de cubeta basculante	107
Figura 7.30: Esquema piezómetro subsuperficial.....	108
Anexo 1: Código fuente para estación piezométrica	112
Anexo 3: Código fuente para estación pluviométrica.....	113

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Variables utilizadas en el modelo PEGH Casablanca	13
Tabla 2.1: Categorización según densidad de drenaje	21
Tabla 4.1: Propiedades de la cuenca Estero el Jote	37
Tabla 4.2: Porcentaje de cobertura por tipo en cuenca Estero el Jote	40
Tabla 4.3: Datos faltantes en series de datos de fuentes de información meteorológicas.....	42
Tabla 4.4: Precipitación promedio anual por década por estaciones meteorológicas	43
Tabla 4.5: Diferencia promedio mensual entre precipitaciones entre producto grillado y promedio ponderado entre estaciones.....	46
Tabla 4.6: Resultados de mediciones	51
Tabla 4.7: parámetros de imágenes históricas	58
Tabla 5.1: Características Sensor de presión de agua	61
Tabla 5.2: Resultados prueba de funcionamiento.....	62
Tabla 6.1: Resultados últimos tres Censos en Quintay.....	71
Tabla 6.2: Volumen abastecido por SSR Quintay	73
Tabla 6.3: Variación mensual de volumen abastecido por SSR Quintay	73
Tabla 6.4: Dotación anual según abastecimiento de SSR Quintay	75
Tabla 6.5: Nivel de ocupación según días en Condominio Santa Augusta.....	77
Tabla 6.6 variación mensual de nivel de riego	81
Tabla 7.1: Descripción de elementos del modelo	88
Tabla 7.2: Consumos de sitios de demanda ingresados en el modelo	93
Tabla 7.3: Otros parámetros de uso de suelo considerados	95
Tabla 7.4: Parámetros de ajuste de calibración	109
Anexo 2: Costos de materiales de estación piezométrica en CLP	112
Anexo 4: Costos de materiales para estación pluviométrica	113

Índice de Ecuaciones

(1) Factor de forma para cuencas hidrograficas.....	20
(2) Pendiente media de la cuenca	20
(3) Densidad de drenaje.....	21
(4) Balance hidrico	22
(5) Modelo balde 1 en WEAP	25
(6) Modelo balde 2 en WEAP	26
(7) Promedio ponderado de precipitaciones entre estaciones	45
(8) Ancho promedio humedal el Jote	54
(9) Área bajo ancho promedio en humedal el Jote	55
(10) Volumen de almacenamiento en función del área transversal.....	58
(11) Conversión a milímetros para pluviometro.....	68
(12) Regresión de población en Quintay	71
(13) Proyección de población en Quintay	71
(14) Pérdidas en el sistema de agua potable de SSR Quintay.....	74
(15) Dotación anual en SSR Quintay	74
(16) Demanda agua potable en SSR Quintay	75
(17) Demanda agua potable en Santa Augusta	76
(18) Evapotranspiración real por producto PML_V2	83

CAPÍTULO I

1. Introducción

1.1. Escenario

El contexto hídrico en el cual se encuentra Chile es complejo, pues se combinan varios factores que generan un escenario de extremo cuidado en la toma de decisiones respecto a gestión, abastecimiento y distribución del agua [1].

Entre los principales factores se encuentran un clima cambiante con pronósticos poco alentadores que afectando ciclos hidrológicos acentúan procesos como la megasequía que se vive desde el 2010 la cual ha generado un déficit del 30% de las precipitaciones en la zona centro-sur de Chile [2]. Esta sequía ha tenido una extensión espacial y temporal únicas en el registro histórico, factor que se suma al crecimiento de la demanda hídrica por habitante debido al crecimiento poblacional y capacidad adquisitiva [3].

Debido a lo anterior, en los últimos años los esfuerzos gubernamentales en Chile se han enfocado en afrontar el contexto mediante una gestión eficiente del agua para que su uso sea sostenible en el tiempo siendo fundamental la planificación estratégica de medidas de intervención y adaptabilidad [4].

Dentro de las funciones de la dirección general de aguas (DGA) [5] en 2019 comenzó a trabajar en el desarrollo de Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) para las 101 cuencas de Chile que contaban con más información y mayores problemas hídricos, con la finalidad de conocer la oferta y la demanda histórica, actual y potencial de agua; establecer el balance hídrico y sus proyecciones a 30 años; diagnosticar la calidad de las aguas subterráneas y superficiales entre otros. [6]

1.2. Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH)

Un Plan Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH) es un documento de carácter indicativo que busca contribuir a la toma de decisiones relacionadas al recurso hídrico con el objetivo de optimizar las funciones económicas, sociales y ambientales de este, otorgando estabilidad y sustentabilidad a largo plazo [7].

Los PEGH nacen a partir de los objetivos estratégicos de la DGA, los cuales son [7]:

- Promoción del uso y acceso del agua a las personas para mejorar la calidad de vida.
- Promoción del aprovechamiento sustentable del recurso hídrico y protección del ambiente.
- Facilitar el funcionamiento del mercado de derechos de agua para impulsar el desarrollo productivo

Es así como la cuenca Estero Casablanca comenzó a ser estudiada en un rango temporal de 1980-2020 y con proyecciones futuras de 30 años.

Uno de los principales objetivos del PEGH Estero Casablanca es determinar el balance hídrico en la cuenca con el objetivo de permitir la realización de un diagnóstico que habilite la determinación de brechas en tres componentes de análisis: balance hídrico, coordinación e información. En esta etapa el PEGH evalúa indicadores que permiten estimar la sustentabilidad de la explotación del acuífero, confiabilidad y sensibilidad para satisfacer las diferentes demandas.

Dentro de los principales resultados se encuentran problemas en la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano. Por otra parte, existe una demanda insatisfecha actual agrícola y de agua potable en la cuenca de 8 [hm³] y 120 [hm³] respectivamente. Además, la información disponible enfrenta el desafío de contrastar los datos históricos con los hechos contemporáneos, que durante las últimas décadas han tendido a enfatizar la importancia de las fuentes de agua subterránea.

Los resultados obtenidos en la etapa mencionada buscan generar un conjunto de acciones que cierren las brechas nombradas anteriormente.

1.3. Modelo hidrológico cuenca Estero Casablanca

Para la obtención del balance hídrico a nivel semanal para el PEGH [1], se realizó un modelo hidrológico en el programa WEAP acoplado con modelación de flujo subterráneo en la plataforma MODFLOW. Se basa, principalmente en la generación de pequeños volúmenes de control dentro de la cuenca, que consideran variables correspondientes a tipo de superficie agrícola y no agrícola, además de entradas y salidas de flujo, tales como: precipitaciones, evapotranspiración, demandas, caudales superficiales y subterráneos, infiltración y afloramientos. En la figura 1.1 se observa el esquema WEAP del modelo hidrológico de la cuenca Estero Casablanca y en la tabla 1.1 se describen las principales variables utilizadas.

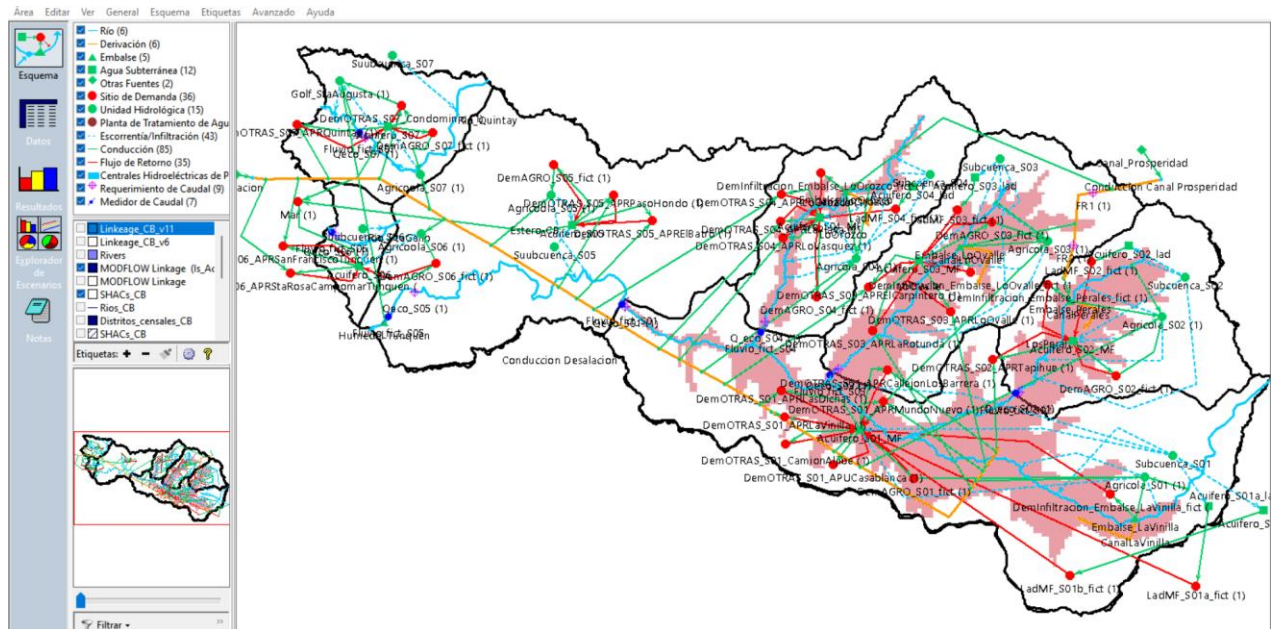


Figura 1.1: Modelo hidrológico PEGH Casablanca [1].

Tabla 1.1: Variables utilizadas en el modelo PEGH Casablanca [1].

id	Variable	Detalle
1	PP Agro	Precipitación caída sobre la superficie agrícola del modelo acoplado
2	PP Subcuenca	Precipitación caída sobre la superficie no agrícola del modelo acoplado
3	ET Agro riego	Evapotranspiración desde la superficie agrícola bajo riego del modelo
3	ET Agro seco	Evapotranspiración desde la superficie agrícola de seco del modelo
4	ET Subcuenca	Evapotranspiración desde la superficie no agrícola del modelo,
5	APR/APU	Consumo de agua potable
6	Caudales subterráneos	Balace entre ingresos y egresos de agua subterránea en el sistema WEAP acoplado
7	Caudales Superficiales	Balace entre ingresos y egresos de agua superficial en el sistema WEAP acoplado
-	Balace Hídrico	Balace de agua cuenca sistema WEAP acoplado
-	Infiltración/Recarga (Inf MF)	Caudal de infiltración desde unidades hidrológicas sobre el acuífero hacia el modelo MODFLOW (recarga directa)

id	Variable	Detalle
-	Infiltración Lateral (Inf lad)	Caudal de infiltración desde unidades hidrológicas que no están sobre el acuífero hacia el modelo MODFLOW
-	Infiltración/Afloramientos desde el estero (Inf río)	Caudal de infiltración desde el río al acuífero MODFLOW
-	/Afloramientos desde el estero (Afl río)	Caudal de afloramiento desde el acuífero MODFLOW al río
-	Extracciones (Extr DAA)	Caudal de extracción desde el acuífero a los nodos ficticios de demanda agrícola

El documento PEGH [1] indica que la cuenca no presenta mediciones de caudales superficiales y el agua dejó de escurrir hace décadas por lo que el énfasis en la calibración se hizo a partir de los niveles en los pozos monitoreados por la DGA, en la figura 1.2 se observa la ubicación geográfica de los pozos en la cuenca.

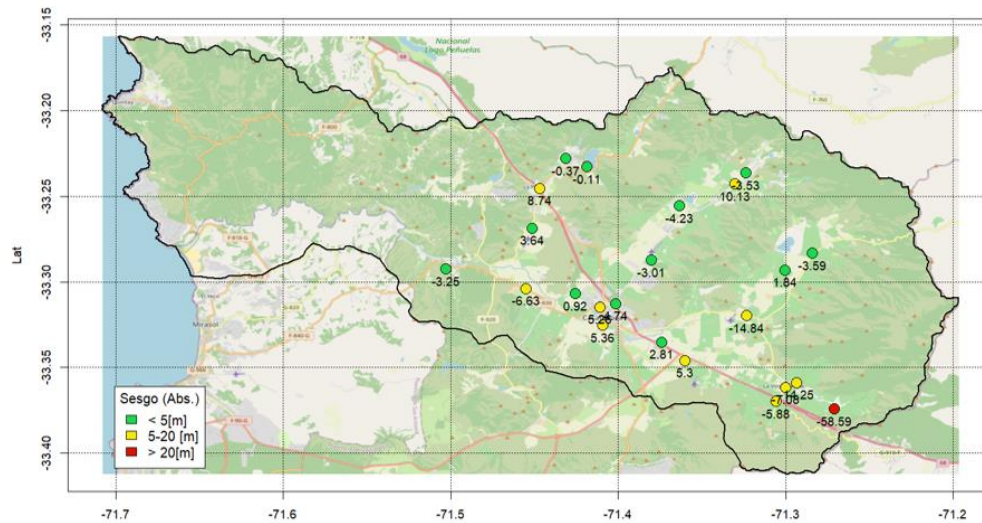


Figura 1.2: Ubicación geográfica de pozos de monitoreo DGA en cuenca Estero Casablanca [1].

Se observa que los pozos monitoreados por DGA para la calibración de este modelo se encuentran en las zonas cercanas al comienzo (parte alta) del estero Casablanca, y la zona costera (parte baja) donde se encuentra Quintay y Tunquén carece de pozos de monitoreo.

Debido a la inexistencia de caudal superficial en la cuenca, la calibración del modelo utilizó información del Balance Hídrico Nacional (BNH) correspondiente al año 1987 [1].

Además, la cuenca no cuenta con estaciones fluviométricas que midan el flujo pasante, por lo que el modelo simuló estaciones (Fluvio_fict_S) a partir de las forzantes climáticas disponibles para la zona, en la figura 1.3 se observan las estaciones fluviométricas simuladas por el modelo.

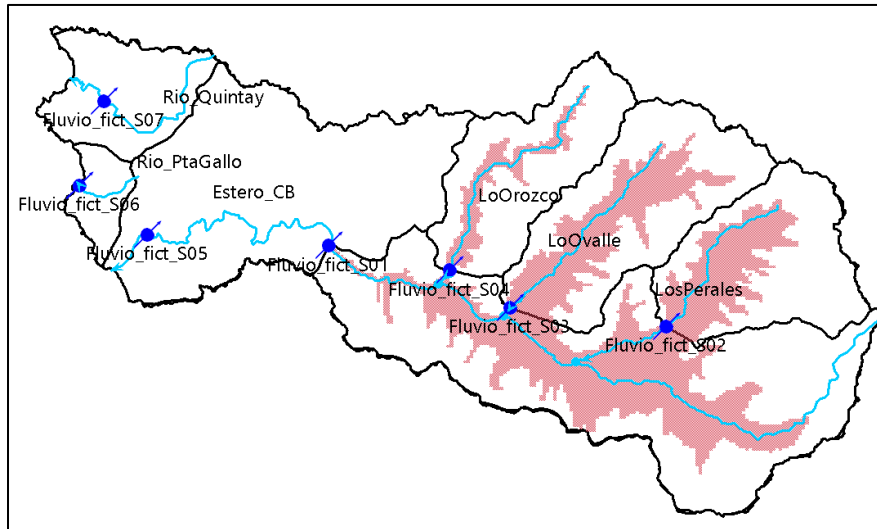


Figura 1.3: Estaciones fluviométricas simuladas en Modelo Cuenca Estero Casablanca [1].

1.4. Descripción del problema

La ubicación de los pozos de monitoreo de la DGA (Fuente principal de calibración) produce que el modelo hidrológico de la cuenca Estero Casablanca se centre en el Estero Casablanca y a sus contiguos Esteros: Lo Orozco, Lo Ovalle y Los Perales, lo que produce una disminución en la atención puesta en la zona costera, en especial en la zona de Quintay, lo cual podría ser acentuado considerando que el Estero Casablanca desemboca en el humedal de Tunquén y no tiene conexión con el Estero el Jote, pudiendo considerarse como sectores hidrológicos independientes. En las figuras 1.4 y 1.5 se muestra la ubicación geográfica de la localidad de Quintay y la ubicación geográfica con respecto a la cuenca Estero Casablanca respectivamente.



Figura 1.4: Ubicación geográfica localidad de Quintay, Elaboración propia a partir de imágenes disponibles en Google Earth Pro.

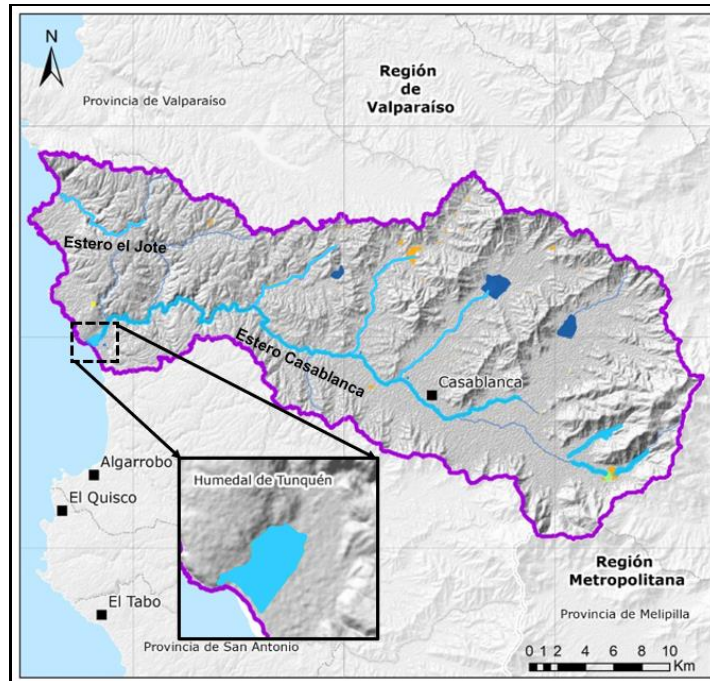


Figura 1.5: Ubicación Estero Casablanca y Estero el Jote [1].

En consideración de lo anterior junto con la falta de información producida por la ausencia de estaciones fluviométricas, estaciones meteorológicas, pozos de monitoreo en la zona de Quintay y la utilización de datos del BHN de 1987 podrían generar consideraciones muy gruesas para el modelo que a su vez produzcan estimaciones poco precisas para la cuenca Estero el Jote en Quintay.

La producción de nuevas fuentes de información como estación de medición fluviométrica, piezométrica y/o meteorológica en la zona de Quintay surgen como solución a largo plazo al problema planteado y además se presentan como una posibilidad de mejora al modelo actual de la cuenca Estero Casablanca.

Uno de los principales problemas del modelo es la escasa cantidad de elementos para la calibración y validación de resultados, es por ello que la utilización de imágenes satelitales que permitan observar cambios de estado del suelo y nivel de acumulaciones de agua a lo largo del tiempo puede resultar importante para solucionar la problemática en la medida que las observaciones puedan ser cuantificables.

1.5. Objetivo

El objetivo principal del presente estudio es realizar una caracterización hídrica en la cuenca Estero el Jote mediante modelación hidrológica en WEAP que considere información integrada entre la utilizada por el modelo del PEGH cuenca Estero Casablanca relativa a Quintay, la obtenida por una nueva estación piezométrica simplificada y estación pluviométrica y el análisis de demandas evapotranspirativas en la zona obtenidas a partir de forzantes climáticas e imágenes satelitales.

1.5.1. Objetivos específicos

- Diseñar, construir e instalar obra de medición piezométrica simplificada en cuenca Estero el Jote.
- Diseñar, construir e instalar obra de medición pluviométrica simplificada en cuenca Estero el Jote.
- Analizar las demandas evapotranspirativas en Quintay mediante uso de imágenes satelitales y sistemas de georreferencia.

- Realizar un modelo hidrológico para la cuenca Estero el Jote.
- Generar mejoras y/o actualizaciones de la zona de Quintay con respecto a modelo hidrológico del PEGH Cuenca Estero Casablanca.

1.6. Alcance del trabajo

- El estudio se ajustará a la cuenca Estero el Jote delimitada según información de imágenes obtenidas a través del satélite STMR, las cuencas o subcuencas limítrofes no serán consideradas en este estudio.
- Se modelará en el programa WEAP en la versión 2021.
- El modelo hidrológico será de simulación superficial con elementos tipo acuífero en WEAP y no contará con un modelo hidrogeológico subsuperficial.
- El modelo hidrológico tendrá un rango temporal consistente con el PEGH Casablanca, 1980-2020

CAPÍTULO II

2. Revisión bibliográfica

Este capítulo tiene como finalidad introducir de manera específica todos aquellos fundamentos científicos en los que se apoyará el estudio actual, dentro de los principales temas se encuentran definiciones de la caracterización hídrica y sus componentes, se definirá el balance hídrico y los principales elementos, también se describe la modelación hidrológica con énfasis en el programa WEAP.

Además, se definen los sistemas de medición fluviométricos y meteorológicos que servirán de respaldo para la posterior propuesta de sistema de medición a instalar.

Se describe el funcionamiento de las herramientas utilizadas, entre ellas, QGIS, GOOGLE EARTH ENGINE, ARDUINO y GOOGLE EARTH PRO.

2.1. Caracterización hídrica

Este apartado tiene como objetivo introducir los principales conceptos relacionados con las cuencas, definición, partes de una cuenca, información disponible para su manejo y elementos de la caracterización de una unidad hidrográfica que permita ejecutar acciones de manejo y gestión de los recursos naturales de dicho ámbito geográfico en apoyo a la seguridad hídrica.

2.1.1. Componentes de una cuenca

Los principales componentes de una cuenca son: divisoria de aguas, cauces afluentes y principal y desembocadura, pueden ser observados en la figura 2.1.

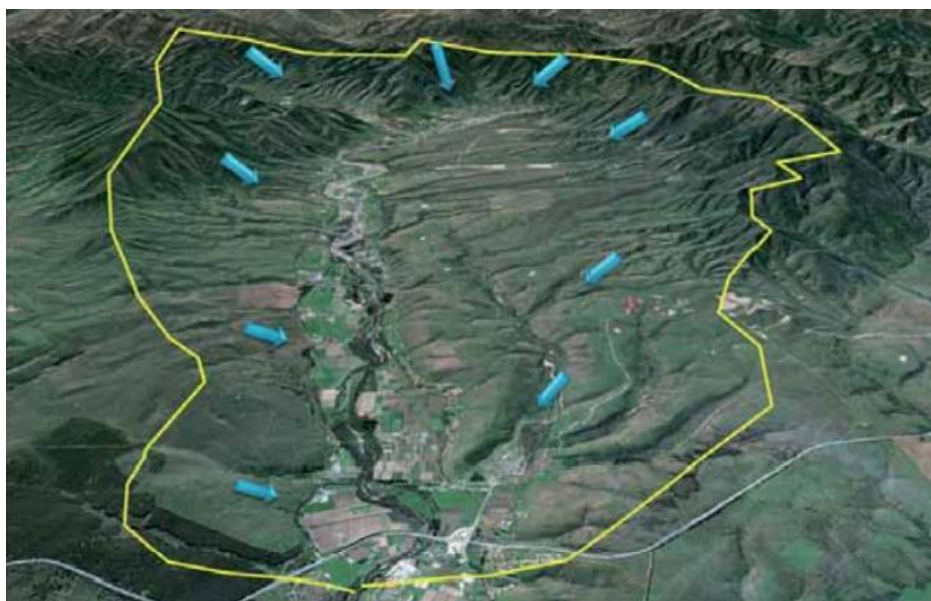


Figura 2.1: Cuenca hidrográfica [9]

La línea amarilla se denomina parteaguas que se define como línea imaginaria que separa las laderas opuestas de una elevación, fluyendo a las aguas de la escorrentía hacia ambos lados de la línea divisoria. Desde el parteaguas nacen los escurrimientos o drenajes afluentes que llegan al río, estero o cauce principal, el cual puede desembocar en otro cauce, en un humedal o al mar.

2.1.2. Ordenamiento para su manejo: Regiones hidrológicas

Bajo el criterio de orden de red es común ver diferenciada la cuenca en unidades menores como subcuenca y sub-subcuenca (microcuenca), hasta un último nivel denominado quebrada. Desde una mirada más amplia la clasificación de las cuencas hidrográficas atendiendo al criterio de jerarquía u orden de la red se visualizan mejor cuando se presentan en escalas que transitan desde lo global hasta lo local, tal como se muestra a continuación, focalizando los ejemplos en la denominación, descripción a las condiciones reales de la red hidrográfica propia de Chile [11]:

- Subcuenca: Subdivisión al interior de una cuenca para denominar a la superficie de menor jerarquía u orden que realiza el drenaje por un tributario del curso principal.
- Subsubcuenca (microcuenca): Subdivisión al interior de una subcuenca para delimitar las unidades hidrográficas más pequeñas dentro de una cuenca principal.
- Quebrada: Superficie mínima de drenaje Subdivisión al interior de una subsubcuenca (microcuenca) que desarrolla su drenaje directamente al cauce principal de una microcuenca. Varias quebradas pueden conformar una microcuenca.

Sin perjuicio de lo anterior, para este trabajo, se denominará a la zona de estudio como “Cuenca” debido a que se construirá un modelo hidrológico independiente y propio para la cuenca Estero el Jote.

2.1.3. Caracterización como unidad hidrográfica de planeación

A continuación, se definen los principales parámetros morfológicos que componen la caracterización de la cuenca [10]:

1. **parámetros físicos:** son aquellos parámetros que responden a las características de tamaño, forma y longitud de la cuenca. Entre ellos se encuentran:
 - I. Área de la cuenca:** Superficie limitada por la proyección horizontal del parteaguas, se obtiene a partir de sistemas de georreferencia, planímetros o cuadrículas y se expresan en [km²] o [ha].
 - II. Perímetro de la cuenca:** Medición lineal del parteaguas, normalmente obtenida desde sistemas de georreferencia, se expresa en [km] o [ha].
 - III. Longitud de cuenca:** Distancia medida desde la salida de la cuenca hasta el límite del cauce principal, a lo largo en línea recta. Es posible medir en sistemas de georreferencia y se expresa comúnmente en [km] o [ha] la longitud de la cuenca es la distancia paralela a la longitud principal [12]. Se muestra gráficamente en la figura 2.2.



Figura 2.2: Longitud de cuenca [12].

- IV. **Forma de la cuenca (R_f):** Su importancia radica en la influencia en el comportamiento del escurrimiento. Una cuenca ancha, con una tendencia a formar un círculo, tiende a formar flujos con escurrimientos pico muy altos. Se define como la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud de esta. [13].

$$R_f = \frac{A_c}{L_c^2} \quad (1)$$

Donde:

R_f : Factor de forma de la cuenca.

A_c : Área de la cuenca.

L_c : Longitud de la cuenca.

La figura 2.3 muestra la forma de la cuenca en función del factor de forma. Un factor pequeño (menor a 0,22) indica una cuenca muy alargada, mientras que un valor mayor a 1,5 indica una cuenca ancha, con forma tendiendo a un círculo. En cuanto al escurrimiento, la cuenca con R_f alto implica problemas de escurrimiento, debido a que este se concentra en la salida de la cuenca al mismo tiempo.

:

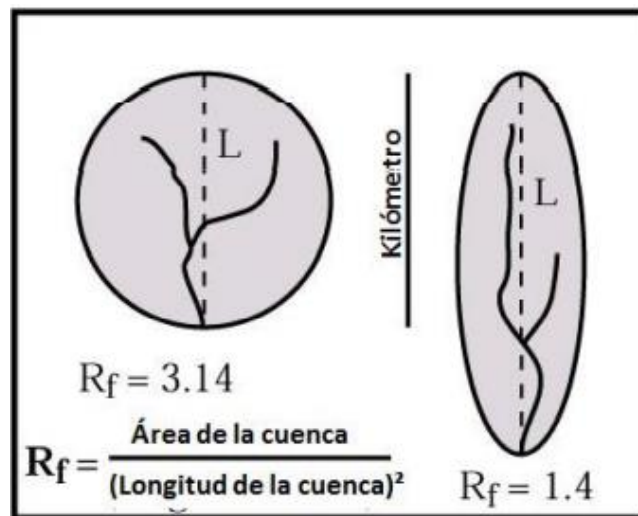


Figura 2.3: Ilustración Factor de forma de la cuenca [12]

- V. **Pendiente media de la cuenca:** Tiene influencia en la respuesta hidrológica en una cuenca. Tanto la pendiente de la cuenca como la pendiente del cauce son importantes. La pendiente de la cuenca refleja la tasa de cambio de la elevación con respecto a la longitud de la cuenca a lo largo del cauce principal. Se calcula como la diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal y la longitud de la cuenca.

$$S = \frac{(H - h)}{L} \quad (2)$$

Donde:

- S:** Pendiente de la cuenca [L/L].
- H:** Punto más alto de la cuenca-parteeaguas.
- h:** Punto más bajo de la cuenca salida.
- L:** Longitud de la cuenca.

1. **Parámetros hídricos:** Son los parámetros que responden a las características y comportamiento de los flujos existentes en la cuenca. Entre ellos se encuentran:

- I. Cauce principal: Longitud, altura mayor y menor y diferencia:** Son de utilidad a la planeación de infraestructura hídrica u obras de regulación, se obtienen a partir de sistemas de georreferencia.
- II. Longitud total de cauces:** Es la medida total de la longitud de todas las corrientes, expresado en [km] o [ha]. La corriente principal se mide de la salida de la cuenca al parteaguas. Todas las otras corrientes se miden desde su nacimiento hasta que desembocan en otro cauce. Es posible obtener un promedio de longitud de corrientes, sin embargo, no se profundizará en este punto debido a que la cuenca en estudio posee solo un cauce principal (Estero el Jote).
- III. Densidad de drenaje:** Se define como la longitud de las corrientes de todos los órdenes dividida por el área total de la cuenca [14].

$$D_d = \frac{L}{A_c} \quad (3)$$

Donde:

- D_d :** Densidad de drenaje.
- L:** Longitud total de las corrientes.
- A_c :** Área total de la cuenca.

La tabla 2.1 interpreta la densidad de drenaje:

Tabla 2.1: Categorización según densidad de drenaje [14]

Densidad de drenaje	Categoría
<1	Bajo
1 a 2	Moderado
2 a 3	Alto
>3	Muy Alto

Usualmente un valor alto de la densidad de drenaje se asocia con una superficie “impermeable”, vegetación escasa y relieve montañoso, en cambio, un valor bajo indica un suelo pobremente drenado y de respuesta hidrológica lenta. En este último caso se infiere que mucha parte de la precipitación se infiltra en el suelo o se encarcha sobre la superficie.

2.2. Balance hídrico

El balance hídrico en una cuenca hidrográfica se puede definir como la diferencia entre la oferta (Entradas) y demandas (Salidas). Esta diferencia significa un cambio en los niveles de volumen almacenado o en la escorrentía producida en cierto rango temporal. Mediante el estudio del Balance Hídrico es posible hacer una

evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre. Puede ser descrito mediante la siguiente ecuación [15]:

$$P + Q_i - Q_o - R - ET = \Delta V_{sup} + \Delta V_{sub} + \Delta H_{suelo} \quad (4)$$

Donde:

- P : precipitación total caída en el tiempo
- Q_i : caudal de ingreso (superficial y/o subterráneo)
- Q_o : caudal de salida (superficial y/o subterráneo)
- R : precipitación retenida por la vegetación.
- ET : evapotranspiración de superficies
- ΔV_{sup} , ΔV_{sub} : volumen almacenado de manera superficial (ríos, lagos, etc.) o subterránea (acuíferos subterráneos, ríos subterráneos, etc.)
- ΔH_{suelo} : humedad contenida en el suelo.

2.2.1. Fuentes de información

para la determinación los distintos componentes presentes en el balance hídrico, se consideraron tres fuentes de información:

Observaciones puntuales (in situ): son aquellas mediciones las cuales incluyen la determinación de parámetros que, debido a sus características, deben ser medidas en campo, es decir que poseen una estructura física de medición permanente o eventual en el territorio de estudio. Especialmente los distintos procesos físicos relacionados con el balance hídrico se diferencian en dos grandes grupos:

- I. Mediciones hidrometeorológicas:** son todas aquellas variables que permiten cuantificar las forzantes meteorológicas del balance hídrico y los caudales pertenecientes a una cuenca, medición de Humedad, precipitaciones, entre otros.
 - II. Mediciones de cauce:** son las mediciones realizadas en las zonas de la red de drenaje o punto de desembocadura, las cuales permiten conocer fluctuaciones en los volúmenes almacenados y humedad del suelo, para este trabajo serán de utilidad para la calibración de los resultados del modelo hidrológico.
- 2. Percepción Remota:** Completamente opuesta a las observaciones in situ, la percepción remota es definida como la obtención de la información disponible de un lugar o zona geográfica, sin necesidad de ir al sitio para la obtención de información (sin hacer contacto físico con la zona de estudio). Para llevar a cabo este tipo de obtención de información suelen utilizarse satélites, aviones y radares. Para aquellas zonas que abarquen grandes extensiones geográficas, suelen realizarse mediciones de tipo satelital, las cuales miden distintas partes del espectro electromagnético y traducen la información reflejada. [40].
 - 3. Reanálisis Climático:** El reanálisis climático es un producto obtenido mediante un examen retrospectivo de las observaciones, donde se asimila un conjunto de datos a nivel histórico (con la mayor calidad posible en los datos) incluyendo información integrada con la finalidad de obtener una descripción lo más fidedigna posible de las ocurrencias climáticas. [40].

2.3. Modelación hidrológica

La base del estudio de la hidrología es la comprensión del ciclo hidrológico, los procesos que ocurren y las relaciones entre las capas superficiales y subterráneas, el principal desafío que implica el estudio es la

medición debido a que las variables que dependen de parámetros subterráneos se miden de forma indirecta, remota y/o utilizando supuestos como es el caso de la infiltración, percolación profunda, flujo subsuperficial, entre otros. Debido a lo anterior los modelos hidrológicos se presentan como una herramienta para conocer la relación entre las distintas variables permitiendo conocer la respuesta de la cuenca en el tiempo [16].

La capacidad predictiva del modelo depende de cómo se construye el modelo, la confiabilidad en de los datos de entrada en relación con los parámetros de uso de suelo y forzantes climáticas, además de la calidad de los elementos de calibración. Cabe destacar que no existe un modelo perfecto aplicable a todas las cuencas, cada cuenca cuenta con condiciones particulares sus parámetros.

2.4. Modelo WEAP

El sistema de modelación que será utilizado para el presente estudio es “Water Evaluation and Planning system” comúnmente conocido como “WEAP” [17]. WEAP es una herramienta de gestión y modelación para la planificación de cuencas. WEAP incluye las diferentes demandas de agua de una cuenca y posee la capacidad e crear escenarios para evaluar diferentes formas de distribución. WEAP incluye un modelo hidrológico superficial con capacidad de integrar elementos tipo acuífero, embalses y reservorios, además WEAP se puede acoplar con otros modelos de aguas subterráneas como MODFLOW o calidad de aguas QUAL2K, sin embargo, para este trabajo solo se trabajará en WEAP. WEAP se caracteriza por poseer un enfoque integrado a la hora de simular sistemas de aguas. Colocando en igualdad de condiciones la oferta (flujo de aguas, aguas subterráneas, embalses y transferencias de aguas) y la demanda (patrones de uso del agua, eficiencias de uso, reutilización, costos y asignación) de agua.

WEAP posee diferentes tipos de objetos en su interfaz, con el fin de modelar los principales componentes de una cuenca: Río, derivaciones, embalses, sitios de demandas, entre otros. Por otra parte, WEAP es un modelo forzado por las condiciones climáticas, debiendo integrar datos de precipitación, temperatura, humedad del suelo, velocidad del viento, entre otros. Estas características convierten a WEAP en un modelo ideal para realizar estudios de variación del balance hídrico y sus componentes a lo largo del tiempo [17]. La figura 2.4 muestra la zona asociada a Quintay llamada “Rio Quintay” dentro del modelo hidrológico PEGH Casablanca.

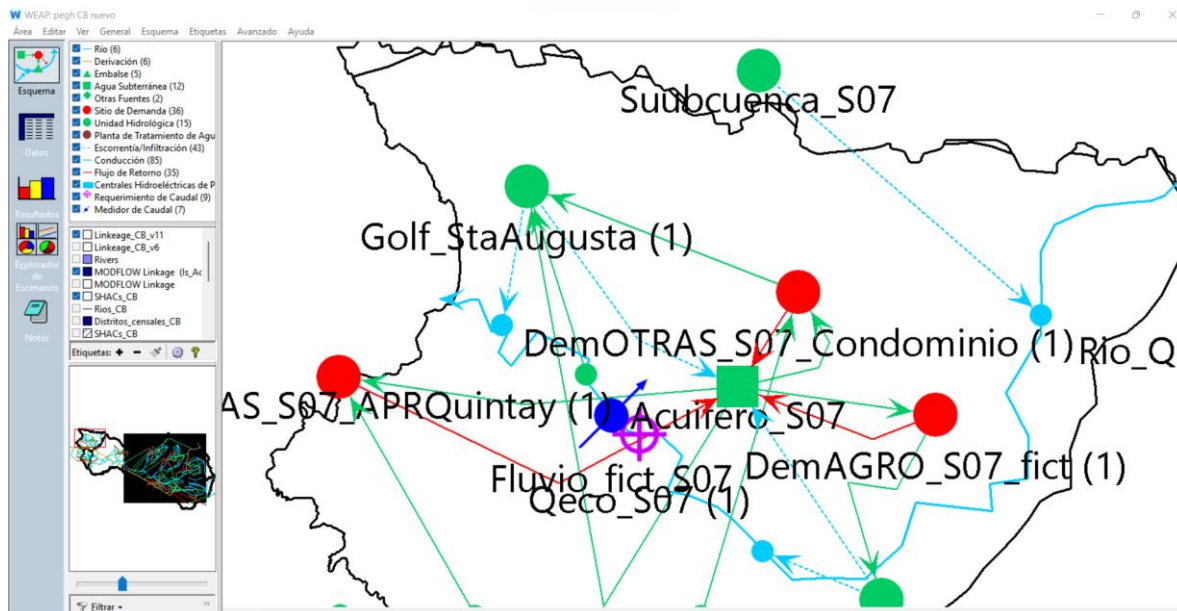


Figura 2.4: Modelo WEAP Cuenca Estero Casablanca para “Rio Quintay”

2.4.1. Métodos de simulación

Dentro de WEAP existen 5 métodos para la simulación de los procesos hidrológicos [18] en las microcuencas: Método de Demandas de Riego Solamente (Método de Coeficiente Simplificado), Método de escorrentía de lluvia simplificado (Método de Coeficiente Simplificado), Método de escorrentía de lluvia (Método de humedad del suelo), Método MABIA y Método de crecimiento de plantas.

El método de escorrentía de lluvia (método de humedad del suelo) es más complejo y representa la cuenca con dos capas de suelo, así como el potencial de acumulación de nieve. En la capa superior del suelo se considera la presencia de raíces, simula la evapotranspiración considerando la lluvia y el riego en tierras agrícolas y no agrícolas, la escorrentía y el Inter flujo superficial, y los cambios en la humedad del suelo. La capa inferior asume que no existen raíces y se compone de una zona con una capacidad de agua determinada. Este método permite caracterizar los impactos del uso de la tierra y/o del tipo de suelo en estos procesos. El enrutamiento del flujo base hacia el río y los cambios de humedad del suelo se simulan en la capa inferior del suelo. En consecuencia, el método de humedad del suelo requiere una parametrización del suelo y el clima más extensa para simular estos procesos.

Este método será considerado en el presente estudio, debido a que es que puede representar la cuenca con mayor nivel de uso de parámetros y es el mismo utilizado por el PEGH Casablanca. En la figura 2.5 se puede apreciar esquemáticamente el método de escorrentía de lluvia (método de humedad del suelo).

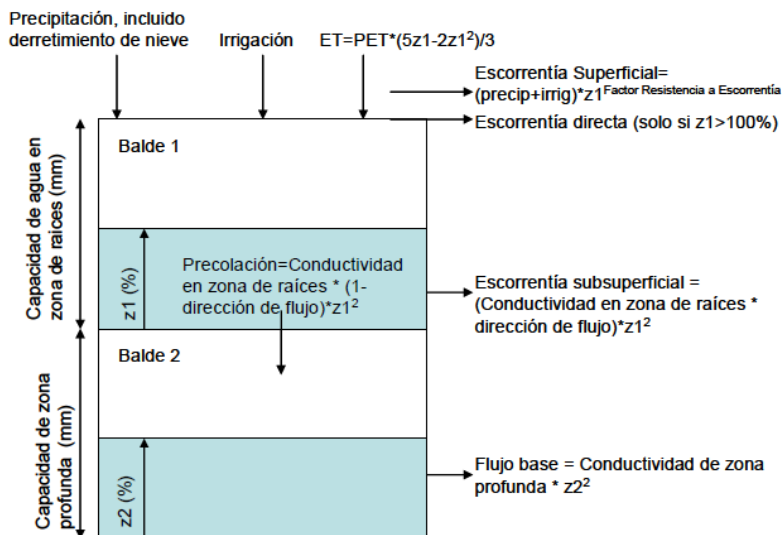


Figura 2.5: Elementos hidrológicos considerados en el método Humedad de Suelo en WEAP [18].

2.4.2. Variables y Parámetros involucrados en el modelo WEAP

El método tiene nueve parámetros que influyen en cada uno de los procesos del balance hídrico:

- K_c : Coeficiente de cultivo.
- S_w : Capacidad de agua del suelo.
- D_w : Capacidad de aguas profundas.
- RRF : Factor de resistencia a la escorrentía.
- K_s : Conductividad en la zona de raíces.
- K_d : Conductividad profunda.
- f : Dirección preferida del flujo.
- Z_1 y Z_2 : Condiciones iniciales de profundidad de baldes.

Este método convierte el clima de cada cuenca en caudales hacia los ríos o nodos de aguas subterráneas, simula procesos como la escorrentía, el flujo intermedio, la percolación o el flujo base. La escorrentía superficial está controlada por el factor de resistencia, la escorrentía directa solo ocurre si la zona de raíces está saturada, además las salidas de la zona radicular son el interflujo y la percolación, que dependen del agua la capacidad de retención, la conductividad del agua del suelo y la dirección preferida del flujo, la dirección de flujo preferida divide el flujo de agua entre flujo intermedio y percolación.

La zona profunda también tiene una capacidad y conductividad de aguas profundas, que controla el flujo base. Por otro lado, como todo modelo, es necesario establecer las condiciones iniciales de algunos parámetros. Z1 y Z2 iniciales son el almacenamiento relativo, expresado en porcentaje de la capacidad hídrica total de la zona radicular y de la zona profunda, respectivamente.

El modelo matemático que tiene el método de la humedad del suelo es un equilibrio hídrico entre entradas y salidas, donde la diferencia entre la entrada y la salida en cada una de las dos capas representa los cambios de humedad en la zona radicular y la zona profunda.

Modelo balde 1:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z^{RRFj}_{1,j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad (5)$$

Donde:

- $Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$: Humedad del suelo del balde superior
- $P_e(t)$: Precipitación efectiva
- $PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right)$: Evapotranspiración
- $P_e(t)z^{RRFj}_{1,j}$: Escorrentía superficial
- $f_j k_{s,j} z_{1,j}^2$: Inter flujo
- $(1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$: Percolación

Descripción:

- j : contador asociado a un elemento hidrológico [$1 \rightarrow N$].
- Sw_j : capacidad de almacenamiento efectivo total de la zona de raíces [mm].
- $z_{1,j}$: almacenamiento relativo o nivel de humedad en la zona de raíces [1,0].
- P_e : precipitación total, incluye el deshielo de la capa de nieve acumulada y el riego [mm].
- PET : evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia (mediante Penman-Monteith) [mm].
- $k_{c,j}$: coeficiente de cultivo asociado a una porción de cobertura de suelo.
- RRF_j : factor de resistencia a la escorrentía, para las distintas coberturas de suelo.
- f_j : dirección preferencial del flujo, estrechamente relacionado con el tipo de suelo, cobertura y topografía del sector, la variación del flujo puede variar de horizontal a vertical.
- $k_{s,j}$: conductividad de la zona de raíces.

Modelo balde 2:

$$D_{w_j} \frac{d_{z_{2,j}}}{dt} = (1 - f_j)k_s z_{1,j}^2 - k_d z_{2,j}^2 \quad (6)$$

Donde:

- $D_{w_j} \frac{d_{z_{2,j}}}{dt}$: Humedad del suelo del segundo balde.
- $(1 - f_j)k_s z_{1,j}^2$: Percolación.
- $k_d z_{2,j}^2$: Flujo base.

Descripción:

D_w : Capacidad de almacenamiento de agua en zona profunda [mm].

k_d : Conductividad en zona profunda.

$z_{2,j}$: Almacenamiento relativo o nivel de humedad en balde 2 [0-1].

2.5. Sistemas de medición

2.5.1. Estación fluviométrica

Las estaciones fluviométricas son aquellas que miden el caudal que lleva un curso de agua, el cual puede ser un río o un estero, dicha información es medida y procesada por la DGA expresando en diferentes unidades de tiempo, con el fin de caracterizar el caudal obteniendo sus valores promedios, instantáneos y extremos [19].

2.5.1.1. Objetivo de las Estaciones fluviométricas

El objetivo general de las estaciones fluviométricas es proporcionar a un mínimo costo las características de los caudales, a lo menos con la aproximación correspondiente a un estudio de factibilidad, en un cauce determinado. En este contexto se entiende por “características de los caudales” todos los datos cuantitativos, promedios y extremos, que definen la distribución estadística del caudal estudiado. Este objetivo asume previamente la existencia de un adecuado funcionamiento de mediciones meteorológicas. El conjunto de estaciones fluviométricas que definen la red fluviométrica debe generar información para la gestión de recursos hídricos por parte de usuarios y apoyar en la mitigación de eventos extremos [20].

2.5.1.2. Características de las Estaciones Fluviométricas

Las estaciones fluviométricas entregan datos que cuantifican el flujo de agua que pasa por un cierto punto de control ubicado en un río, estero, quebrada o canal. La medición directa de este flujo se realiza básicamente de dos formas: las de aforos y las de niveles de agua. Desde el punto de vista de la continuidad de la información y de su disponibilidad existen distintos tipos de estaciones de medición fluviométricas en Chile:

- **Puntos con aforos aislados:** Puntos donde sólo se realizan aforos sistemáticos. La frecuencia de las mediciones de esta estación puede ser desde trimestral hasta mensual.
- **Estaciones limnimétricas:** Estaciones donde un observador realiza lecturas diarias en un limnómetro.
- **Estaciones de registro continuo:** Estaciones donde se genera un registro de alturas que es almacenado en papel en el caso de limnógrafos o en memoria digital en el caso de estaciones con data logger. Estas estaciones entregan la información a nivel horario. La recolección de los datos se realiza durante los aforos o mantenciones, por lo cual la información está disponible con un cierto desfase, en ciertos casos debido al traslado de los datos y en otros por el proceso de digitalización de la información contenida en los rollos de papel de los limnógrafos.

- **Estaciones de registro continuo con plataforma satelital:** Estaciones que constan de un data logger y que además tienen la capacidad de entregar la información en tiempo real, sin necesidad de recolección in situ.

Independientemente del tipo de estación, en todas ellas se realizan aforos sistemáticos con una frecuencia entre 3 y 12 veces al año. Distintos componentes pueden encontrarse en una estación fluviométrica, por ejemplo, en una estación con sistema de medición continuo puede existir un limnógrafo que requiera de un observador. Las distintas componentes que pueden componer una estación fluviométrica son las siguientes:

- **Aforos sistemáticos (AF):** En todas las estaciones existentes se realizan aforos con una frecuencia que varía entre las 3 y 12 veces al año, tanto para tener medidas de caudal fidedignas, como para mantener actualizada la curva de descarga.
- **Estación Limnimétrica (LM):** Entrega lecturas diarias hechas por un observador sobre una regla limnimétrica. Las anotaciones del observador son posteriormente digitadas.
- **Registros Limnigráficos (LG):** Medición continua de la altura de agua mediante un sistema mecánico que deja un registro en papel. Estos registros deben ser digitados o digitalizados para su posterior uso.
- **Registro en data logger (DL):** Medición continua que registra la altura de agua a través de un transductor de presión y almacena los datos en memoria digital.
- **Plataforma satelital (PS):** Las plataformas satelitales consisten en un registro continuo con data logger que permite la transmisión de datos a una central entregando información prácticamente en tiempo real. La plataforma satelital es utilizada también para componentes de otras redes de medición.

Todas las mediciones, excepto las realizadas con aforos, entregan las alturas de escurrimiento en la sección de control, de las que se calculan los caudales utilizando la curva de descarga, característica de cada estación.

2.5.2. Estación pluviométrica

Una estación pluviométrica es la encargada de medir las precipitaciones mediante el uso de un pluviómetro. El pluviómetro es un dispositivo que se emplea para poder medir las precipitaciones en una zona durante una determinada cantidad de tiempo. Estos datos de precipitaciones se van registrando y producen series de datos de precipitaciones.

El pluviómetro por lo general cuenta con un recipiente o probeta graduada donde se almacenan las precipitaciones y permite a un operador registrar los niveles de lluvia cada cierto intervalo de tiempo. Un pluviómetro es capaz de medir la lluvia, el granizo, la nieve, la llovizna y la aguanieve caída en un sector. En la figura 2.6 se muestra el pluviómetro manual.

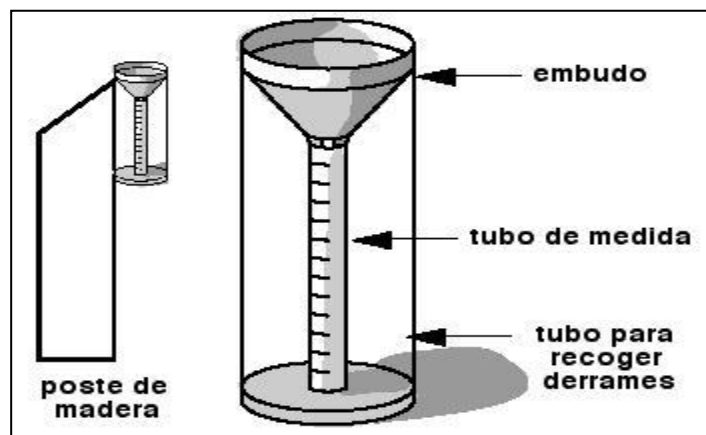


Figura 2.6: Pluviómetro Manual, [21]

2.5.2.1. Pluviómetro de doble cubeta basculante

Este instrumento mide las precipitaciones mediante un mecanismo de cubetas calibradas de idénticas proporciones que señalizan el volumen de precipitación obtenido mediante una acción de conmutación. La conmutación del mecanismo en que la cubeta vacía la lluvia colectada en uno de los cubos y pone al otro cubo listo para continuar el proceso de medición.

La cantidad de veces que se realiza este movimiento es registrada, almacenada y guardada comúnmente en sistemas digitales que utilizan elementos electrónicos.

Para obtener el volumen de precipitación caída en cierto intervalo de interés, se contabiliza el número de veces que la cubeta ha cambiado de posición por el volumen necesario para que un cubo gemelo (ver figura 2.8) cambie de posición, luego este valor de volumen es dividido por el área superficial del círculo que forma el embudo y se obtienen la lluvia en unidad de longitud, usualmente en milímetros, [mm].

Una vez se cuente con los valores de agua caída en términos de longitud, se pueden realizar pluviogramas y hietogramas de lluvia en intervalos determinados de tiempo. La figura 2.7 muestra el esquema de pluviómetro de doble cubeta basculante.

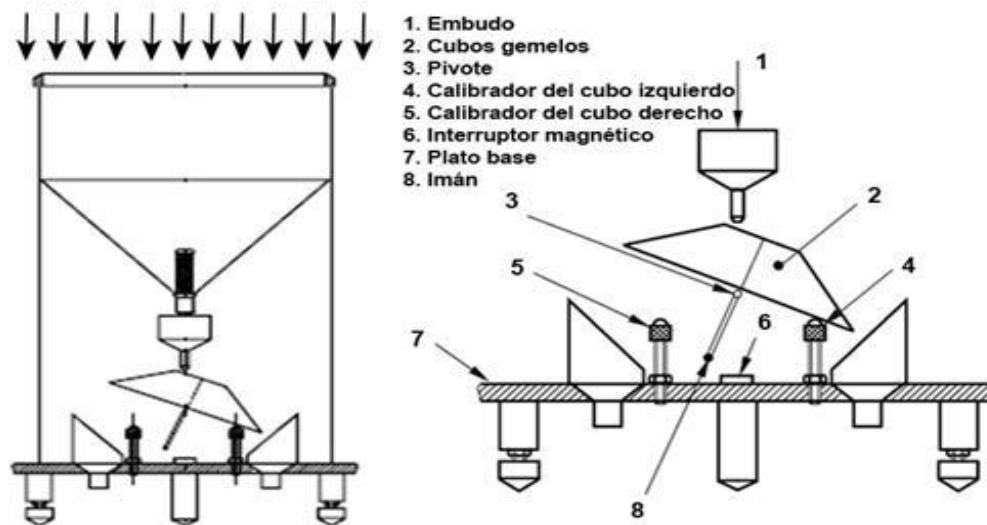


Figura 2.7: Esquema del pluviómetro de doble cubeta basculante [21]

2.6. Herramientas

Este punto tiene como objetivo describir brevemente el objetivo y funcionamiento de las principales herramientas utilizadas en el presente estudio.

2.6.1. QGIS

Los Sistemas de Información Geográfica SIG o GIS (por su acrónimo en inglés) son sistemas que facilitan la visualización, análisis y almacenaje de datos relacionados con el espacio físico. Esto con el fin de relacionar estos datos con fenómenos geográficos y urbanos de todo tipo reflejados en un mapa [22].

Sus herramientas son necesarias para superar la visión sectorial y consolidar una comprensión integral del territorio mediante la interacción de las dimensiones ambiental, cultural, económica, social, espacial, etc.

Un SIG está compuesto por subsistemas para:

- **Procesamiento de imágenes:** conversión de imágenes satélites satelitales a datos de mapa que pueden ser fácilmente interpretados.

- Precipitación acumulada [mm].
- Escorrentía [mm].
- Humedad del suelo [mm].
- Radiación de onda corta de superficie descendente [W/m²].
- Equivalente en agua de nieve [mm].
- Temperatura máxima [°C].
- Temperatura mínima [°C].
- Presión de vapor [kPa].
- Velocidad del viento [m/s].
- Déficit de presión de vapor [kPa].
- Índice de gravedad de la sequía de Palmer [adimensional].

La Interfaz del sistema se muestra en la figura 2.9.

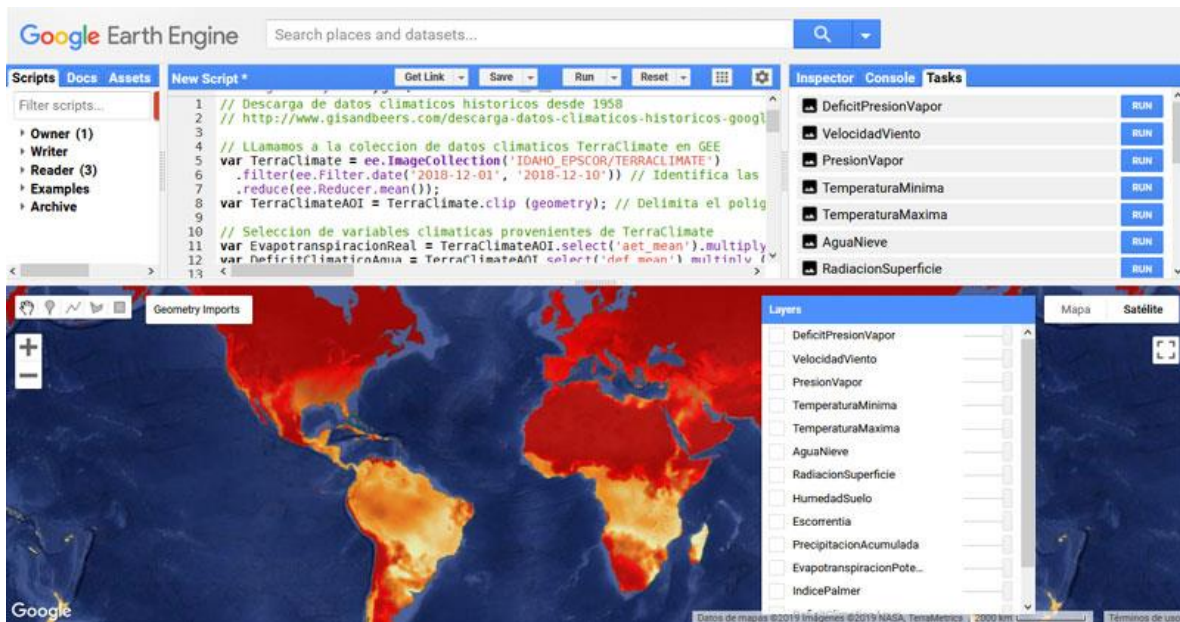


Figura 2.9: Interfaz Sistema Google Earth Engine [24].

2.6.3. ARDUINO

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre (ver figura 2.10) que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla (principalmente con cables Dupont) [25].



Figura 2.10: Placa electrónica Arduino [25]

2.6.4. Google Earth Pro

Google Earth Pro es una herramienta que ofrece el conjunto más completo de datos geospaciales disponibles de manera pública e incluye imágenes de alta resolución, escaladas en 3D por ciudades, mapas detallados, imágenes panorámicas desde calles, imágenes históricas y puntos de interés importantes, como, patrones climáticos. Google Earth Pro posee funciones adicionales para la visualización de imágenes, importación de datos de sistemas de información geográfica (GIS) [26]. La Interfaz del sistema se muestra en la figura 2.11.

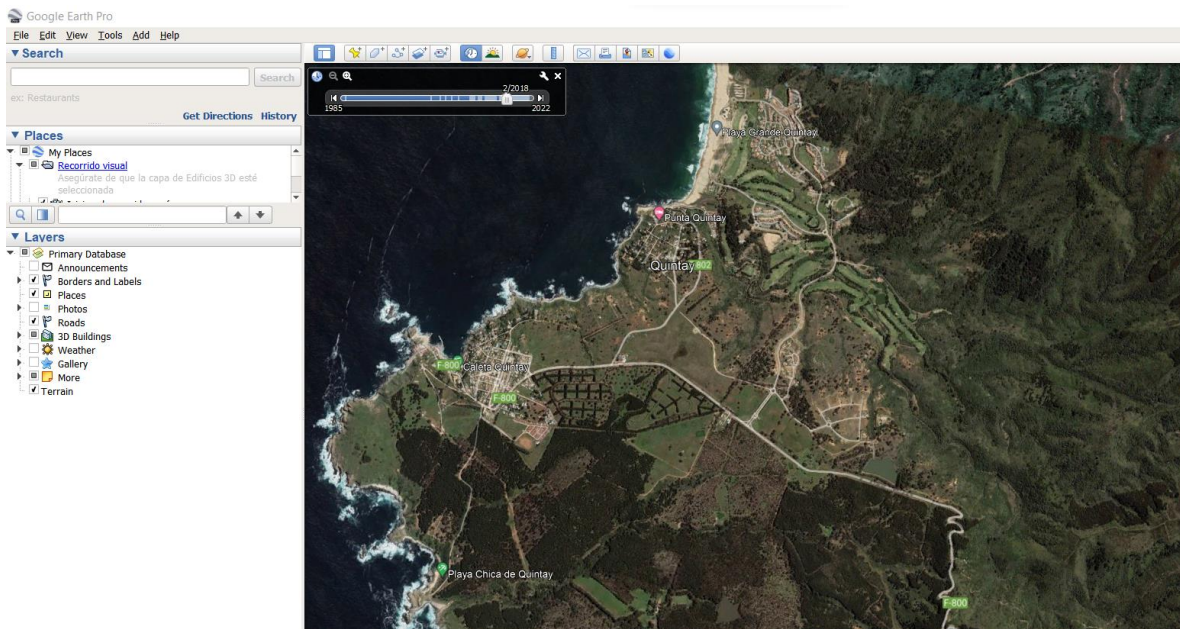


Figura 2.11: Interfaz programa Google Earth Pro, Elaboración propia.

CAPÍTULO III

3. Descripción de la metodología a utilizar

Este capítulo busca describir los componentes seleccionados para la obtención de los objetivos propuestos.

Para la obtención del balance hídrico con el nivel de detalle requerido de la cuenca Estero el Jote es necesario integrar la información obtenida desde las estaciones meteorológicas, indicadores y censos demográficos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) entre ellos: uso agua potable, necesidades ambientales, riego para cultivos, entre otros, y las demandas evapotranspirativas.

El Balance hídrico en la cuenca se define como la diferencia entre los caudales de entrada y salida en la cuenca en estudio.

3.1. Balance hídrico

El esquema en la figura 3.1 muestra los principales flujos de entradas y salidas en la cuenca.

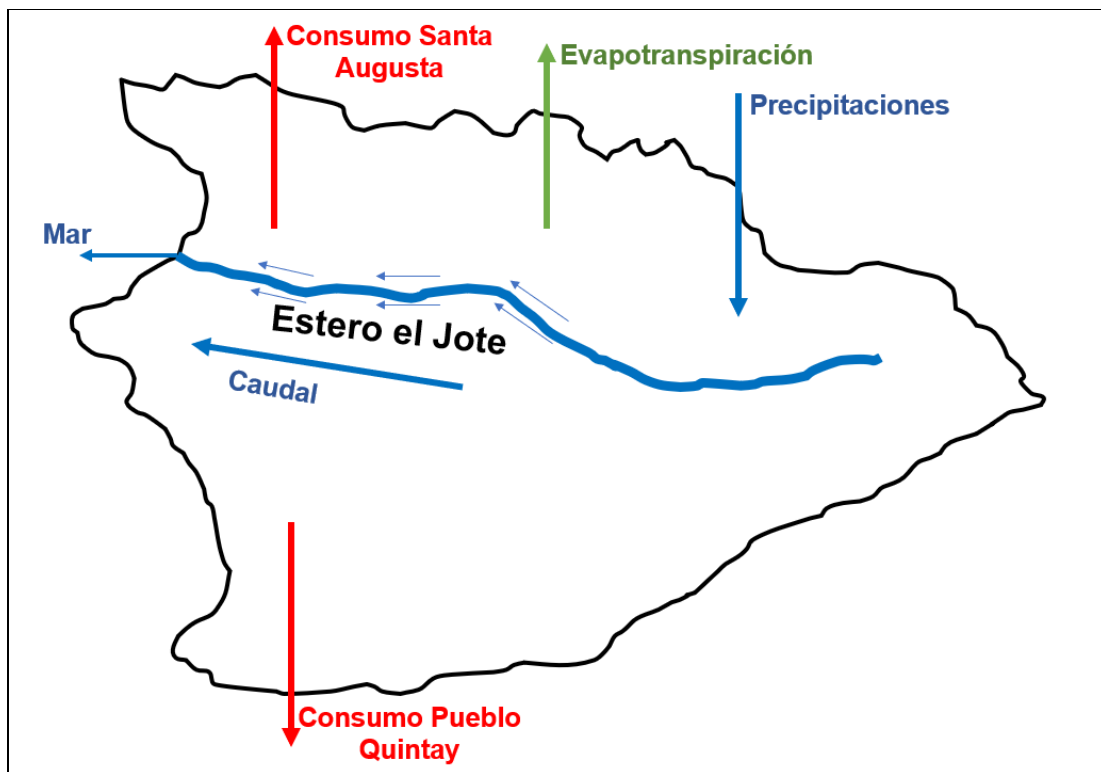


Figura 3.1: Entradas y salidas de agua en cuenca Estero el Jote.

El diagrama de la figura 3.2 muestra el procedimiento para la obtención y validación de la información necesaria:

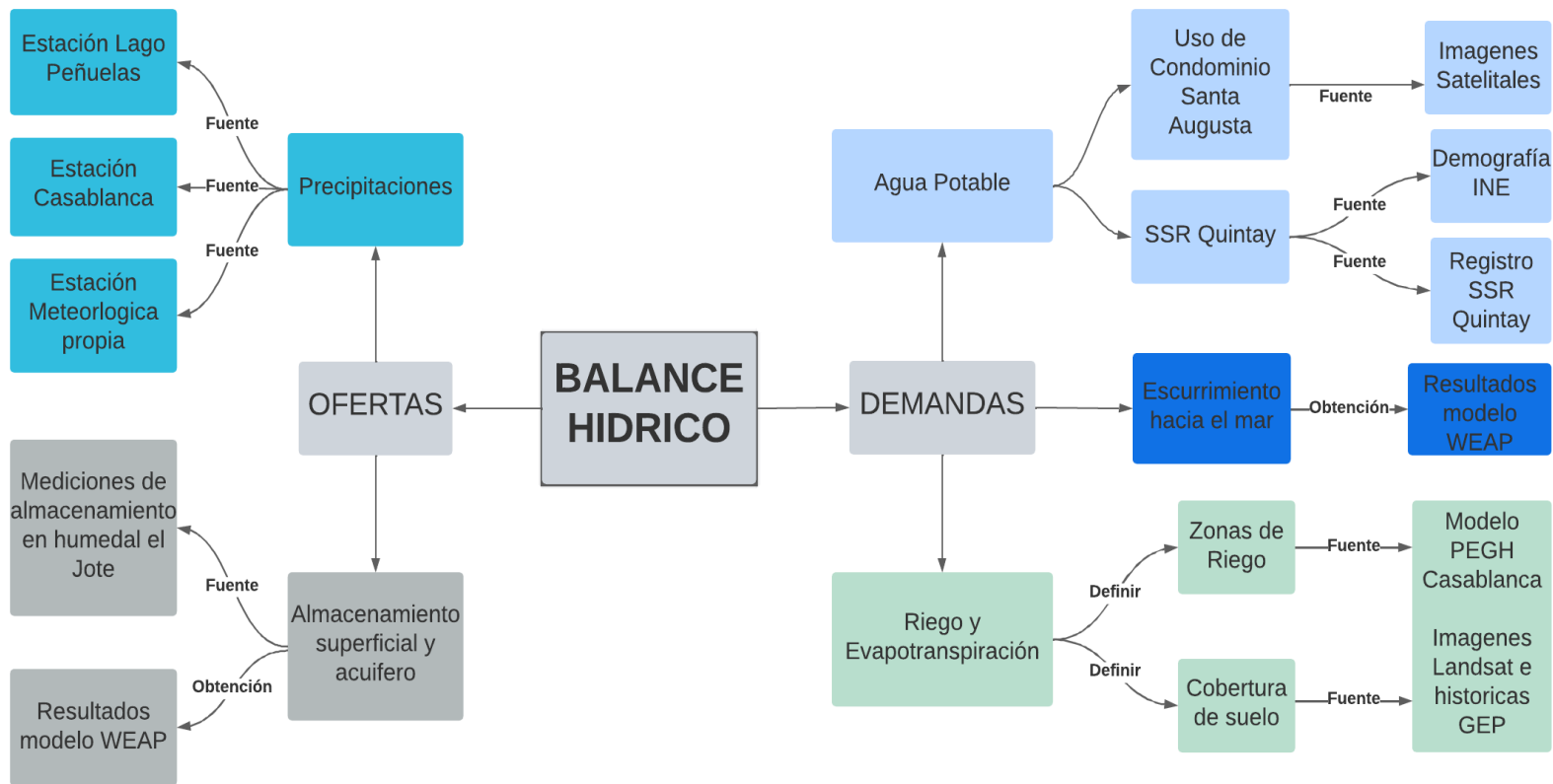


Figura 3.2: Diagrama de metodología para la obtención del balance hídrico.

- **Precipitaciones**

Es la forzante climática más importante debido a que es la oferta de agua inicial en la cuenca, es por ello que alcanzar los valores de precipitación con el mayor nivel de precisión posible puede generar un modelo hidrológico más cercano a la realidad. Si bien el modelo hidrológico tendrá una resolución temporal semanal, existen fuentes de información que poseen las series de datos de precipitaciones a nivel diario pudiendo tener mayor grado de información sobre crecidas y, por consiguiente, caudales peaks en la cuenca.

Se analizarán las series de datos de precipitaciones del modelo hidrológico PEGH Casablanca correspondiente a la cuenca “Río Quintay” y se compararán con las series de datos de las estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca disponibles en el explorador CR2 [28].

- **Almacenamiento superficial y Acuífero**

Para tener información relativa a este punto, es necesario tener mediciones de profundidad en la desembocadura del estero, conocido como “Humedal el Jote” es importante tener una aproximación al perfil transversal del humedal y contrastar el estado actual de almacenamiento y como ha cambiado a lo largo del tiempo, para este último punto se hará uso de las imágenes satelitales históricas disponibles en Google Earth pro y en conjunto con supuestos se obtendrán curvas de: Área-Volumen y Elevación-Volumen, que podrán ser ingresadas al modelo hidrológico para la modelación del humedal con un elemento tipo embalse. Finalmente, el modelo hidrológico debe ser capaz de entregar valores de volumen y elevación del humedal que sean consistentes con los volúmenes observados.

El acuífero será modelado en la parte baja de la cuenca, cerca del humedal y se definirán el flujo principal a partir de información georreferenciada (Ubicación de sitios de demanda y extracciones de agua).

- **Agua potable**

Los principales extractores de agua para consumo humano son el servicio sanitario rural de Quintay (SSR Quintay) y el condominio Santa Augusta, el consumo de agua de ambos componentes será obtenido a través del producto entre la dotación y la población de cada sitio.

La dotación de uso para el SSR se obtendrá a partir del análisis de los registros del SSR con los valores del decreto 743 que indica la dotación promedio para servicios de agua potable rural, por otra parte, la dotación del condominio Santa Augusta es incierta por lo que se definirá un nivel de consumo a partir de lo que indica el decreto 743 y las observaciones de actividades consumidoras de agua disponibles en el condominio (actividades deportivas, restaurantes, riego de jardines de casas y edificios, piscinas, entre otros).

El nivel de población del pueblo de Quintay (abastecido por SSR Quintay) se puede obtener a partir de los censos realizados por el INE [27], para ello se tienen tres censos con información disponible dentro del rango temporal del modelo: 1992, 2002 y 2017.

El condominio Santa Augusta se define como población flotante, es decir, tiene un mayor nivel de actividad en época de verano y festivos, muchas de las viviendas se encuentran con una ocupación menor el resto del año, por lo que se definirán niveles de ocupación para cada semana respecto a una población total definida a partir del número de viviendas.

- **Riego y Evapotranspiración:**

Para este punto es necesario definir la cobertura vegetal del suelo en la cuenca, que puede ser extraída a partir de imágenes del satélite Landsat, también, se definirán las superficies de riego como campo de golf del condominio y jardines, para ello, se definirán las áreas a partir de imágenes de Google Earth pro.

Los valores de evapotranspiración serán los resultados del modelo hidrológico, y se validarán con el producto PML_V2 0.1.7.

Los productos Penman-Monteith-Leuning Evapotranspiration V2 (PML_V2) incluyen la evapotranspiración (ET), en sus tres componentes y el producto primario bruto (GPP) a 500 [m] y 8 [días] de resolución durante 2000-2020 y en un rango espacial de -60°S a 90°N. Las principales ventajas del producto PML_V2 son:

- Estimaciones acopladas y de transpiración y GPP a través de la conductancia del dosel [29].

- Dividir la ET en tres componentes: transpiración de la vegetación, evaporación directa del suelo y vaporización de la lluvia interceptada de la vegetación [29].
- Los productos funcionan bien frente a las observaciones en 95 sitios de flujo de todo el mundo y son similares o notablemente mejores que los principales productos ET y GPP de última generación, ampliamente utilizados por las comunidades científicas del agua y ecología [29].

CAPÍTULO IV

4. Descripción de la Cuenca Estero el Jote

El presente capítulo tiene por objetivo describir las principales características de la cuenca en estudio, se abordan propiedades morfométricas, hidráulicas, red de drenaje y punto de cierre, además se determina el tipo de cobertura de suelo en la cuenca a través de imágenes satelitales y se definen parámetros importantes para el modelo hidrológico como son las forzantes climáticas y los sitios de demandas e interés.

4.1. Delimitación de la cuenca Estero el Jote

La localidad de Quintay (ver figura 4.1) se encuentra en la zona costera norte de cuenca Estero Casablanca, su drenaje principal es el Estero el Jote, el cual divide las principales zonas de vivienda de la localidad; Condominio Santa Augusta al norte y el pueblo de Quintay al sur. La siguiente imagen muestra los límites geográficos de la localidad de Quintay.

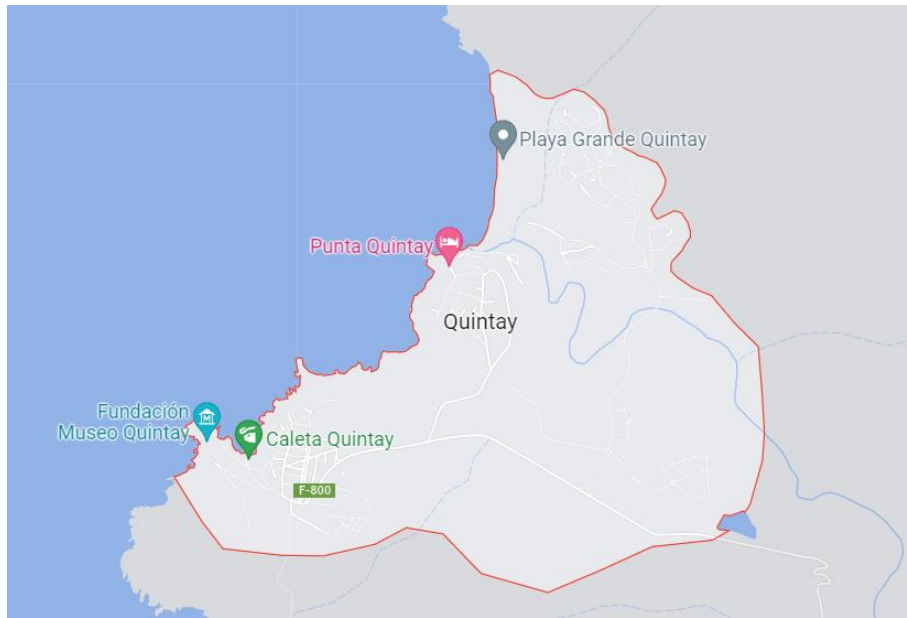


Figura 4.1: Localidad de Quintay Obtenido desde Google Maps

Para la delimitación de la cuenca se utilizan los mapas de Google para la visualización del espacio territorial junto con los modelos de elevación digitales (DEM) obtenidos desde los datos disponibles de la misión de la NASA “Shuttle Radar Topography Mission” ó “SRTM” [30] definiendo los paralelos -72 Oeste y -71 Este y los meridianos -33 Norte y -34 Sur para sus límites.

Los DEM descargados en esta fuente podrían tener fallas producidas por la presencia de valores discrepantes entre píxeles y depresiones provocadas por zonas sin información, es por ello por lo que se corrige el DEM mediante funciones de relleno QGIS la cual busca aproximar los valores en las zonas donde existan problemas. Una vez corregido el DEM se delimita la cuenca con base en la desembocadura del Estero el Jote, se obtiene el cauce principal, la red de drenaje y centroide de la cuenca, estos elementos se muestran en la figura 4.2.

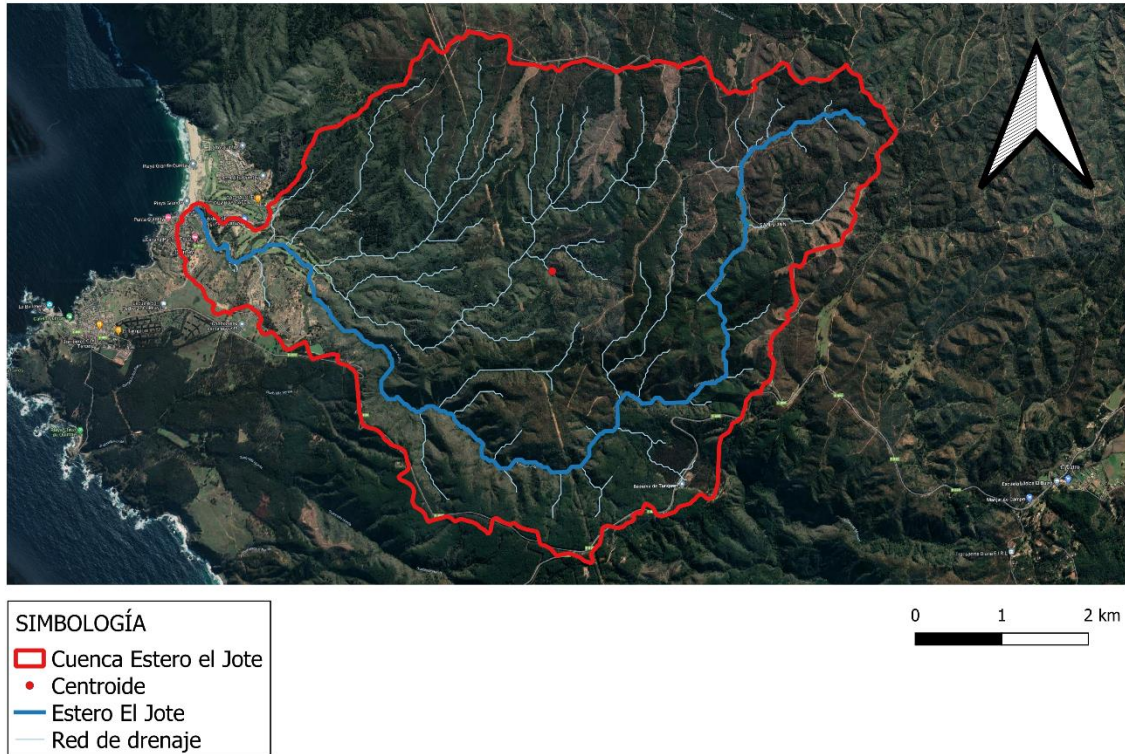


Figura 4.2 Cuenca Estero el Jote, centroide, red de drenaje y estero el Jote

4.2. Parámetros geomorfológicos de la cuenca Estero el Jote

Los parámetros de la tabla 4.1 fueron obtenidos con funciones integradas en QGIS, a partir de las capas construidas en 4.1.

Tabla 4.1: Propiedades de la cuenca Estero el Jote

Tipo	Parámetro	Unidad	Valor
Propiedades morfométricas	Centroide X	WGS 84	-71.63985
	Centroide Y	WGS 84	-33.18986
	Área	[Km ²]	29,8
	Perímetro	[Km]	27,65
	Longitud cartesiana	[Km]	9,76
	Longitud elipsoidal	[Km]	8,186
	Ancho	[Km]	3,053
	Pendiente media	[%]	0,083
	Cota máxima	[m]	596
	Cota salida	[m]	6
	Elevación media	[m]	350,2

Tipo	Parámetro	Unidad	Valor
Propiedades cauce principal	Longitud	[Km]	14,36
	Long. hasta divisoria	[m]	501,5
	Cota mayor	[m]	528
	Cota menor	[m]	6
	Pendiente media	[%]	0,036
Propiedades red de drenaje	Long. total de drenajes	[Km]	186,6
	densidad de drenaje	[Km ² /Km]	6,26
Punto cierre de cuenca	Coefficiente de compacidad	[Km/Km]	1,43
	factor forma	[Km ² /Km ²]	0,313
	Coordenada X	WGS 84	-71.68389
	Coordenada Y	WGS 84	-33.18222

Del coeficiente de compacidad se concluye que la cuenca es oblonga y el factor de forma es relativamente bajo lo cual indica una cuenca alargada con baja susceptibilidad a crecidas con valores peaks muy altos en las curvas de descargas. Las figuras 4.3 y 4.4 muestran el perfil altimétrico del Estero el Jote:

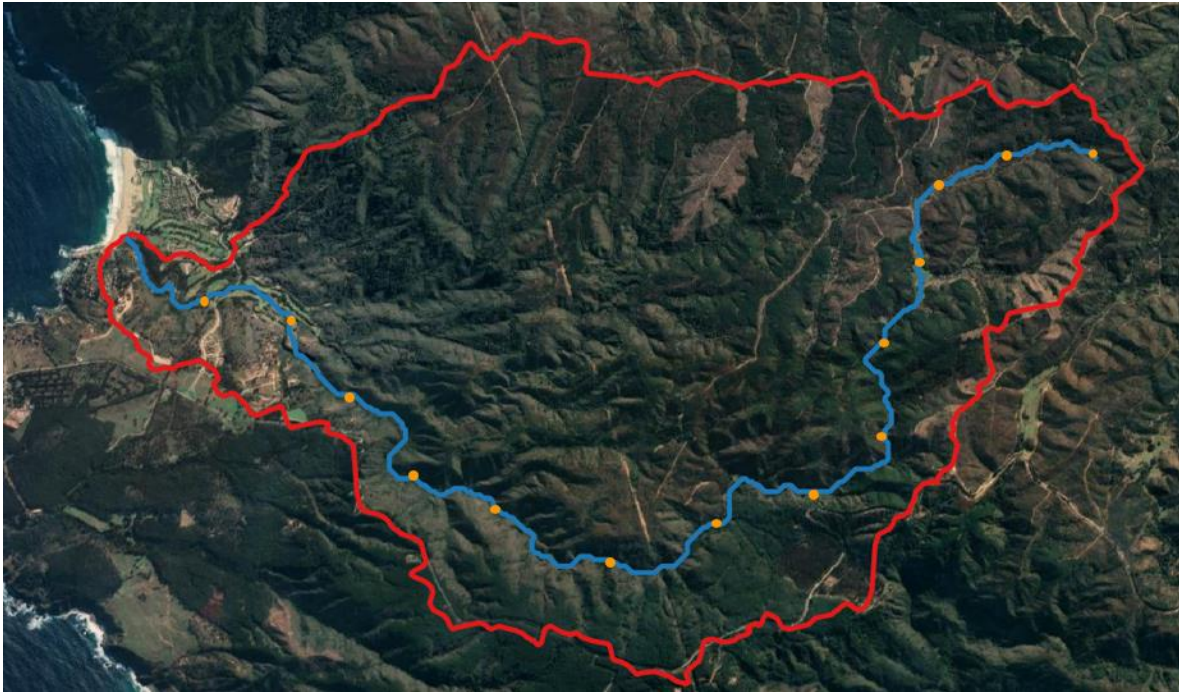


Figura 4.3: Estero el Jote con puntos cada 1 [Km] Elaboración propia.

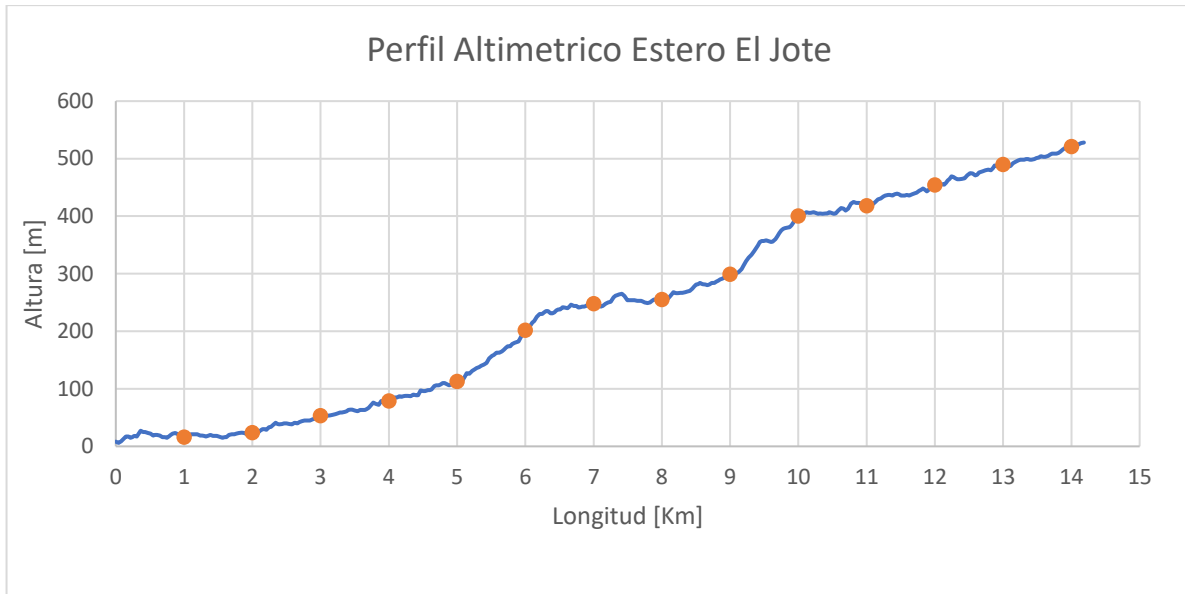


Figura 4.4: Perfil Altimétrico Estero el Jote, Elaboración propia.

4.3. Cobertura de suelo

Uno de los parámetros importantes para la caracterización y modelación de la cuenca es la determinación de cobertura de suelo con el fin de obtener estimaciones de cobertura vegetal y coeficientes de cultivo asociados a las demandas naturales del suelo por evapotranspiración.

Para la determinación de lo anterior se utilizó (debido a su buena sensibilidad a la vegetación verde [31]) la combinación de imágenes de las bandas espectrales 5, 4 y 3 con arreglo pancromático del satélite Landsat 8 el cual tiene una resolución de 15 [m]. Obteniendo el esquema representado en la figura 4.5:

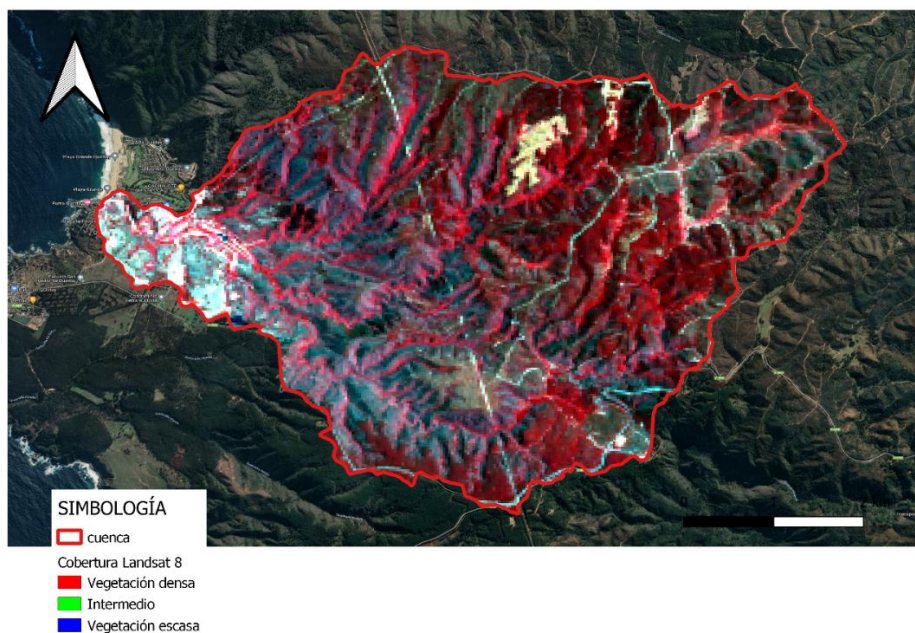


Figura 4.5: Cobertura de suelo de la cuenca Estero el Jote, Elaboración propia

Las tonalidades en la composición de color son [31]:

- *Rojo*, indica una vegetación sana y bien desarrollada.
- *Rosa*, áreas vegetales menos densa o con vegetación menos desarrollada.
- *Blanco*, áreas con escasa o nula vegetación.
- *Azul oscuro* o *negro* indica la presencia de agua.
- *Marrón*, vegetación arbustiva muy variable.
- *Beige-dorado*, zonas de transición, prados secos asociados a matorral ralo.

En base a lo anterior se definieron 3 tipos de coberturas de suelo: Bosques, Arbustos/matorrales y Suelo sin vegetación/Urbano desde mayor densidad vegetal a menor densidad vegetal respectivamente. Mediante procesamiento de imagen en QGIS se obtuvo el siguiente reporte de áreas mostrado en la tabla 4.2:

Tabla 4.2: Porcentaje de cobertura por tipo en cuenca Estero el Jote

Tipo de cobertura	Área [Km ²]	%
Bosques	18,54	62,2
Arbustos y matorrales	10,29	34,5
Suelo Urbano o sin vegetación	0,98	3,3
Total	29,81	100

4.4. Clima

El presente apartado busca describir las forzantes climáticas de la cuenca relevantes para la construcción del modelo hidrológico.

De acuerdo con el estudio DGA 2014 [32], la zona de estudio presenta un clima templado mediterráneo en donde las precipitaciones se presentan en alrededor de un 80% entre los meses de invierno y con una estación seca desde septiembre hasta abril. Se presenta una gran cobertura de nubosidad matinal de procedencia marina.

4.4.1. Fuentes de información meteorológicas

La principal fuente de información para la obtención de las series temporales de las forzantes climáticas son los productos grillados del centro climático CR2MET [33] disponibles en formato NETCDF. El conjunto de datos contiene información meteorológica (precipitaciones y temperaturas) en una grilla de 5 [Km] de resolución aproximadamente para el territorio chileno y con el periodo 1979-2019.

La técnica utilizada para la construcción de este producto se basa en regionalización estadística de datos de reanálisis climático atmosférico-disponibles en grillas de 70 [Km] de resolución. El método utiliza modelos estadísticos con funciones de transferencia para traducir precipitación, flujos de humedad y otras variables de gran escala [33]. En la figura 4.6 se muestra la comparación entre el nivel de precipitaciones observado por las estaciones meteorológicas disponibles en el territorio nacional y los resultados del producto grillado.

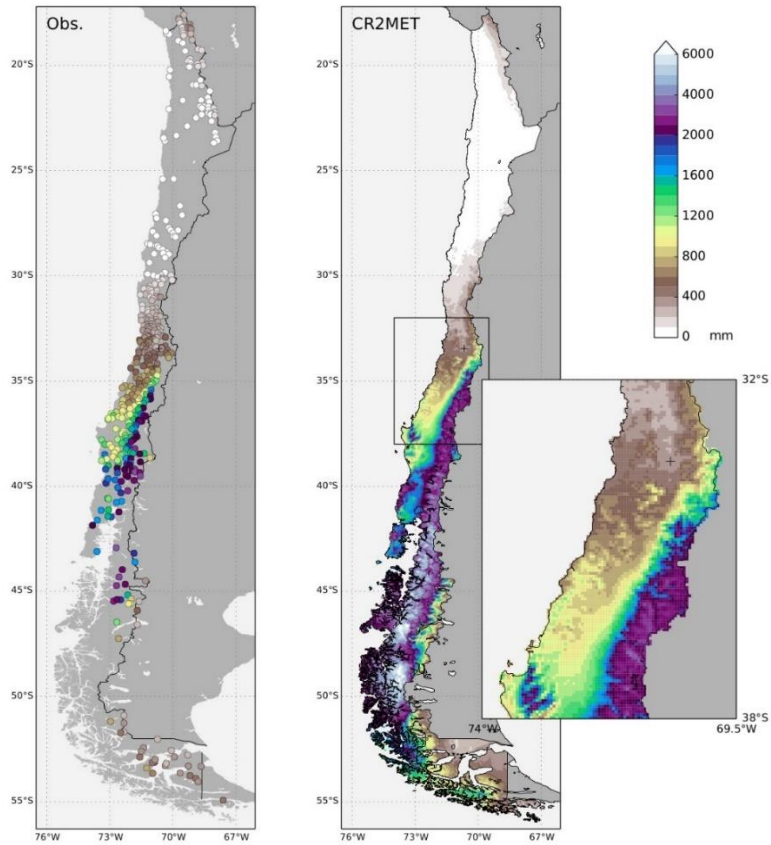


Figura 4.6: Producto grillado desde plataforma CR2MET [33]

Además de los productos grillados se considera la información proveniente de las estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca de las cuales se puede extraer información a través del explorador climático CR2.

Las estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca Estero el Jote son; Estación Casablanca y Lago Peñuelas (ver figura 4.7), es por ello que serán consideradas en el estudio junto con los productos grillados.

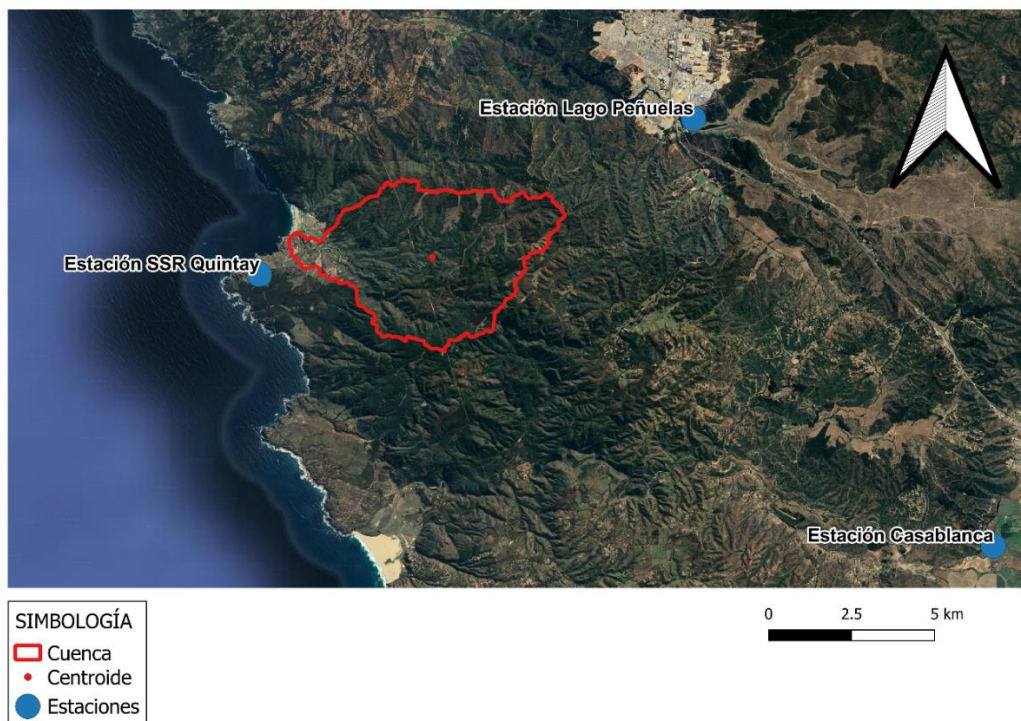


Figura 4.7: Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas

La estación Rodelillo y Casablanca se encuentran a 9,34 [Km] y 19,88 [Km] del centroide de la cuenca Estero el Jote respectivamente, mientras que la estación ubicada en la oficina de SSR Quintay está a solo 5,2 [Km].

4.4.2. Precipitaciones y temperatura

Para la obtención de la serie de datos diaria de las precipitaciones se compararon los datos del producto grillado y las estaciones meteorológicas con el fin de estudiar las diferencias y definir una única serie de datos para el modelo hidrológico.

El producto grillado presenta datos a nivel diario desde el 01/01/1979 a 31/03/2020 sin datos faltantes, en cambio, las series de datos de las estaciones meteorológicas presentan datos con distinta extensión temporal y con datos faltantes a nivel mensual o días específicos. La tabla 4.3 muestra la cantidad de datos faltantes para las distintas fuentes de información.

Tabla 4.3: Datos faltantes en series de datos de fuentes de información meteorológicas

	Lago Peñuelas	Casablanca	Producto grillado
Fecha inicio	01/01/1979	01/01/1986	01/01/1979
Fecha de termino	30/04/2019	30/08/2019	31/03/2020
Meses sin datos	Sept. 1993	Junio 1992	-
	Oct. 1993	Abril 1993	-
	Mar. 2016	Agosto 1999	-
	-	Octubre 1999	-
	-	Agosto 2016	-
	-	Julio 2017	-
	-	Diciembre 2017	-

	Lago Peñuelas	Casablanca	Producto grillado
Días sin datos	2 en 1998	1 en 1986	-
	2 en 2016	1 en 1991	-
	-	1 en 2015	-
	-	3 en 2016	-

Para la serie de datos del modelo hidrológico se necesita la información diaria desde el 01/01/1980 hasta el 31/12/2019 es por ello que se consideraron los rangos temporales de cada fuente de información y se rellenaron los datos faltantes con el promedio a nivel diario de los últimos 3 años para cada mes y día sin dato. La figura 4.8 muestra la comparación de las series de precipitaciones diarias para las tres fuentes de información en donde se observa que los datos medidos en Estación Lago Peñuelas son muy similares en cuanto a los peaks y nivel de precipitación a los simulados por el producto grillado, en cambio, la estación Casablanca presenta valores menores respecto de los otros dos conjuntos de datos, esta idea es reforzada si se calculan las precipitaciones anuales promedio por década mostradas en la tabla 4.4.

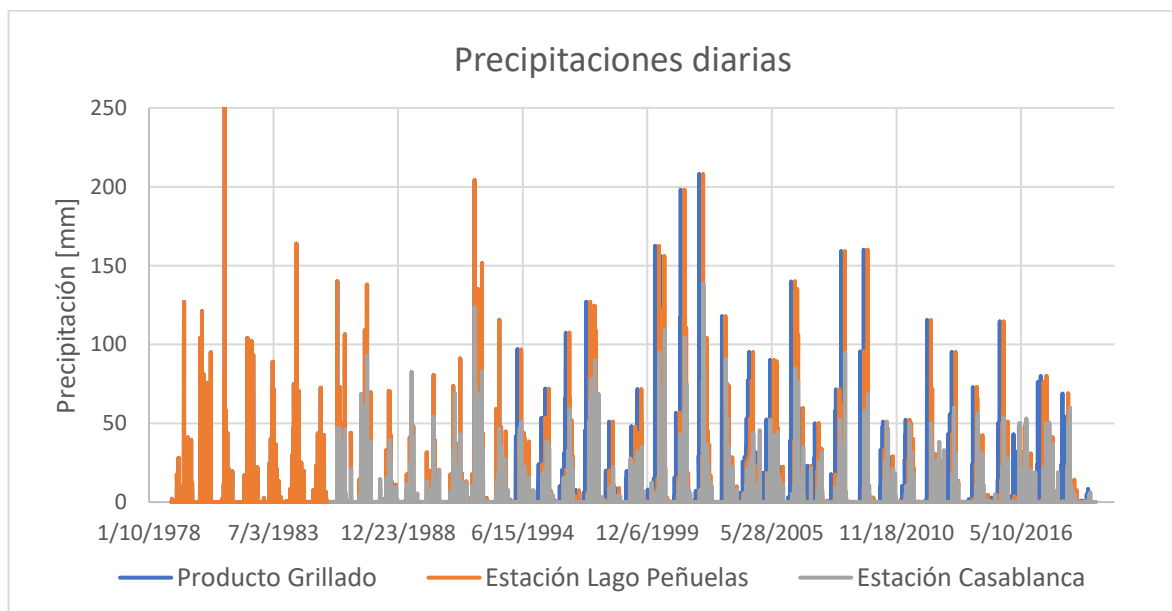


Figura 4.8: Precipitaciones a nivel diario por estación

Tabla 4.4: Precipitación promedio anual por década por estaciones meteorológicas

	Lago Peñuelas [mm]	Producto grillado [mm]	Casablanca [mm]
1979-1989	796	796	453
1990-1999	635	627	357
2000-2009	726	725	442
2010-2019	438	454	281

Por otra parte, la Estación Casablanca no presenta datos de temperaturas medias diarias y la estación de Lago Peñuelas solo tiene información hasta 1994 dejando un espacio de 26 años faltantes según el rango necesario para el modelo, es por ello que se decide utilizar la serie de datos de temperaturas del producto grillado (ver figura 4.9). Las temperaturas medias diarias no han presentado mayor variación con el paso de los años,

teniendo valores medios cercanos a 14°C, temperaturas medias de 9°C a 10 °C en invierno y cercanas a 19°C en el verano.

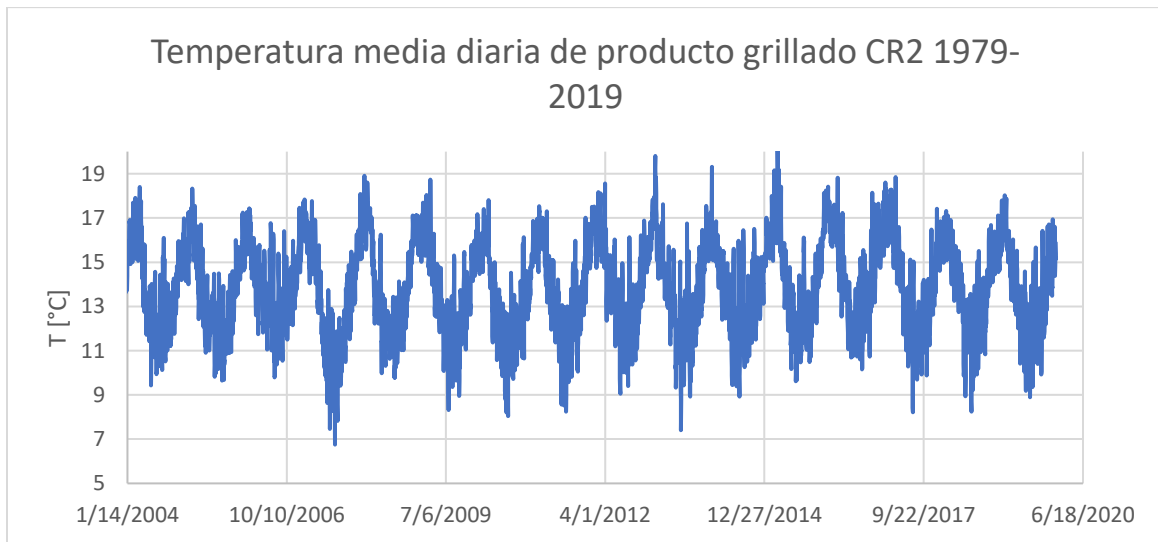


Figura 4.9: Temperatura diaria de modelo PEGH Casablanca

A partir de las precipitaciones de las tres fuentes de información y los datos de temperaturas del producto grillado se obtiene el climograma mostrado en la figura 4.10.

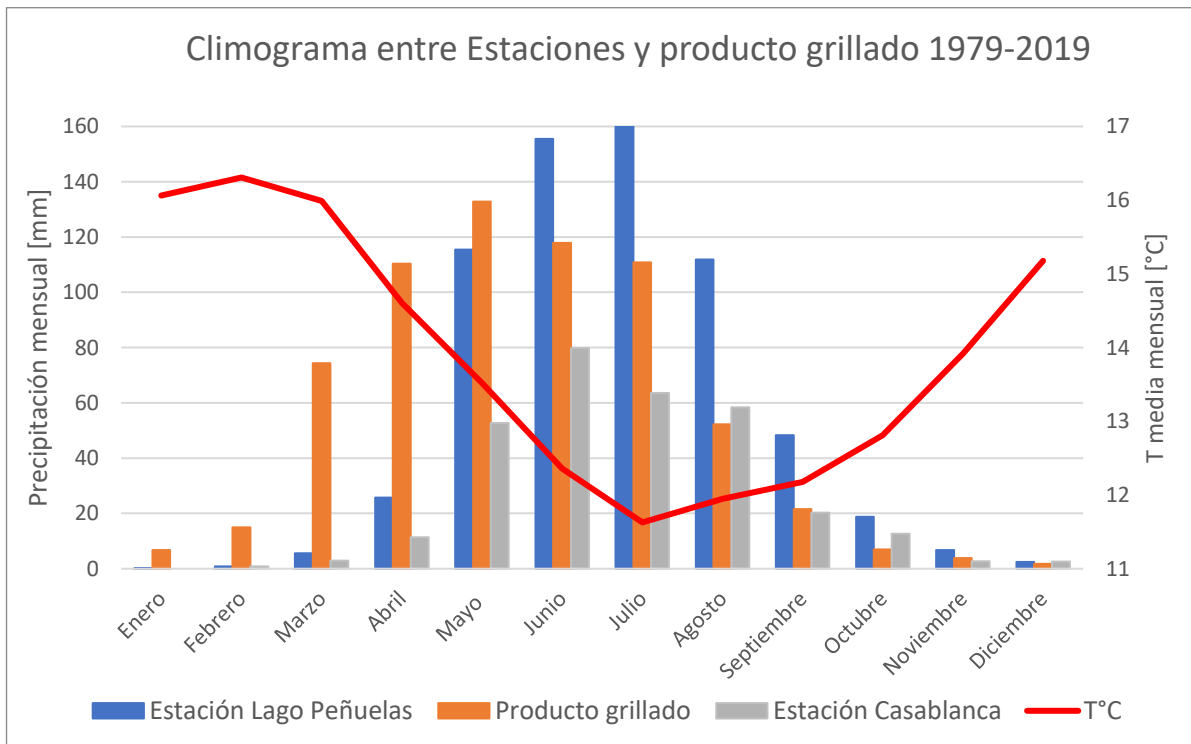


Figura 4.10: Climograma entre estaciones meteorológicas

Si bien el producto grillado obtiene los datos a partir de relaciones estadísticas de reanálisis climático podría no ser preciso para una cuenca del tamaño de la cuenca en estudio debido al rango espacial para el que fue

construido, específicamente podría estar sobreestimando las precipitaciones desde Febrero a Mayo y subestimando para Junio a Octubre.

Debido a lo anterior se decide utilizar para la construcción del modelo hidrológico el promedio ponderado entre los valores de las precipitaciones de ambas estaciones (Lago Peñuelas y Casablanca) y su distancia al centroide de la cuenca, de la forma:

$$PP_{mh} = \frac{PP_{LP} * (d_{Cas-cen}) + PP_{Cas} * (d_{LP-cen})}{d_{Cas-cen} + d_{LP-cen}} \quad (7)$$

Donde:

PP: Precipitaciones (*mh*: modelo hidrológico, *Cas*: Estación Casablanca, *LP*: Estación Lago Peñuelas)

d: Distancia entre (*Cas*: Estación Casablanca, *LP*: Estación Lago Peñuelas y *cen*: Centroide cuenca)

Obteniendo así el climograma para el modelo hidrológico de la figura 4.11.

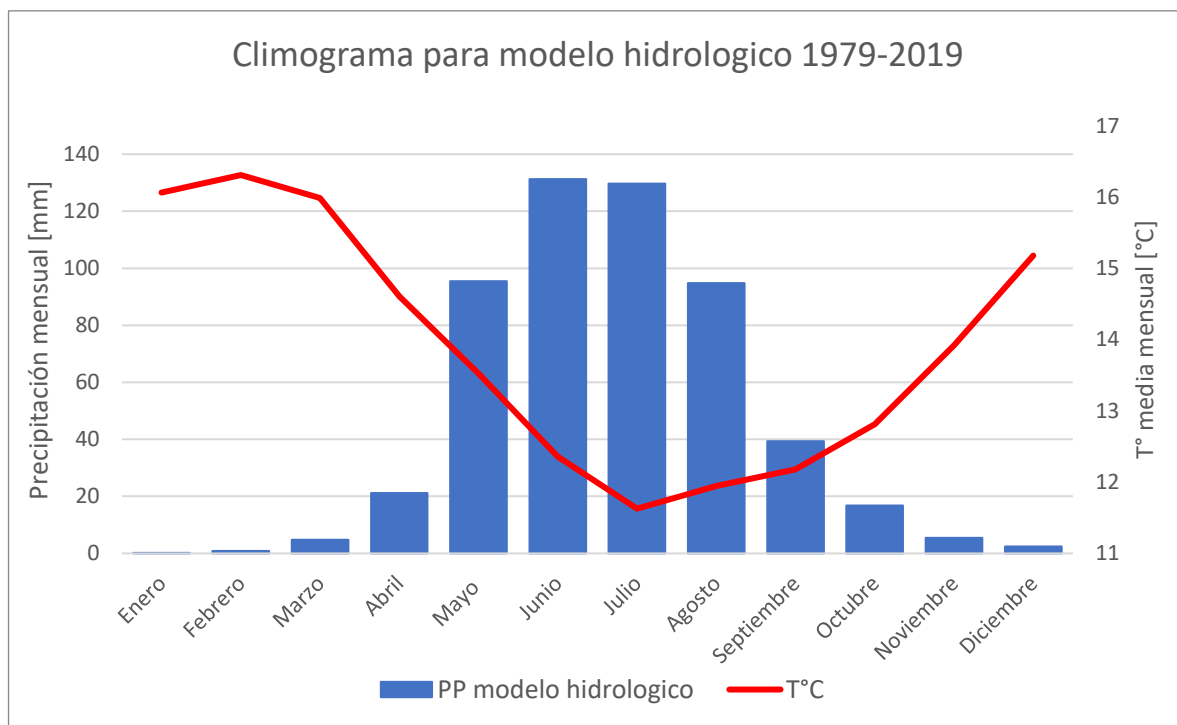


Figura 4.11: Climograma para modelo hidrológico

Con la finalidad de comparar los valores de las precipitaciones obtenidas para el modelo hidrológico y el modelo PEGH Casablanca, se obtienen las diferencias porcentuales anuales mostradas en la figura 4.12. Se observa que la serie de precipitaciones anuales definida para el nuevo modelo hidrológico es siempre menor o igual para el rango temporal de trabajo que el producto grillado y presenta una disminución promedio anual del 16% que se traduce a 107 [mm/año] con respecto al producto grillado utilizado en la elaboración del modelo PEGH Casablanca. Cabe destacar que para los primeros 6 años del tiempo de estudio (1980-1985) no existen datos de la estación meteorológica Casablanca por lo que la diferencia entre el producto grillado y el climograma para el modelo hidrológico es 0.

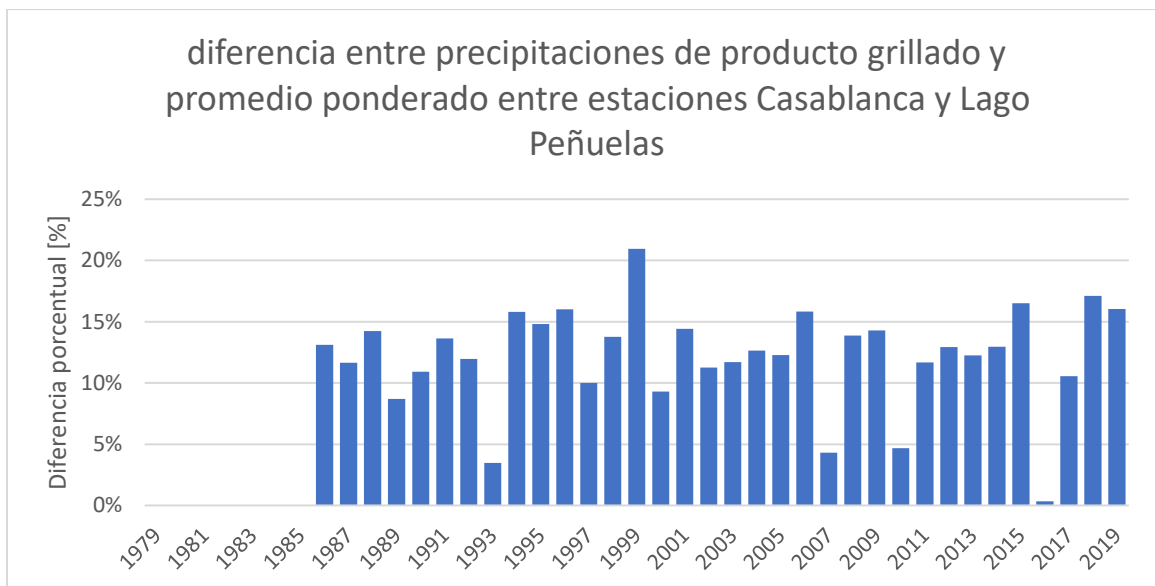


Figura 4.12: diferencia entre precipitaciones de producto grillado y promedio ponderado entre estaciones Casablanca y Lago Peñuelas

Esta diferencia si bien es considerable, se acentúa en los meses desde Enero a Abril, superando valores del 80% como se puede apreciar en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Diferencia promedio mensual entre precipitaciones entre producto grillado y promedio ponderado entre estaciones

mes	Prom. pond. entre estaciones [mm]	Producto grillado [mm]	Diferencia
Enero	0	7	97%
Febrero	1	15	94%
Marzo	5	74	94%
Abril	21	110	81%
Mayo	96	133	28%
Junio	134	118	12%
Julio	131	111	16%
Agosto	95	52	45%
Septiembre	39	22	45%
Octubre	17	7	59%
Noviembre	5	4	30%
Diciembre	2	2	31%
total	548	654	16%

Lo anterior sugiere que el producto grillado estaría suponiendo que existen lluvias mayores a 10 [mm] para 9 de los 12 meses del año (ver figura 4.10), subestimando los periodos secos del año, lo que podría producir diferencias en la respuesta hidrológica de la cuenca entre los modelos.

4.4.3. Otras forzantes climáticas

Debido a que el explorador CR2 no cuenta con datos de humedad relativa, velocidad de viento y fracción de nubosidad y el acceso no es público en la plataforma CR2MET para las variables mencionadas, se decide

utilizar las series temporales usadas para la construcción del modelo PEGH Casablanca, específicamente para la unidad hidrológica “Rio Quintay” (Ver figura 2.4). Las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 muestran los promedios mensuales desde 1980 a 2020 de las forzantes climáticas: humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad respectivamente que fueron utilizadas en el modelo hidrológico del PEGH Casablanca para la unidad hidrológica Rio Quintay [1].

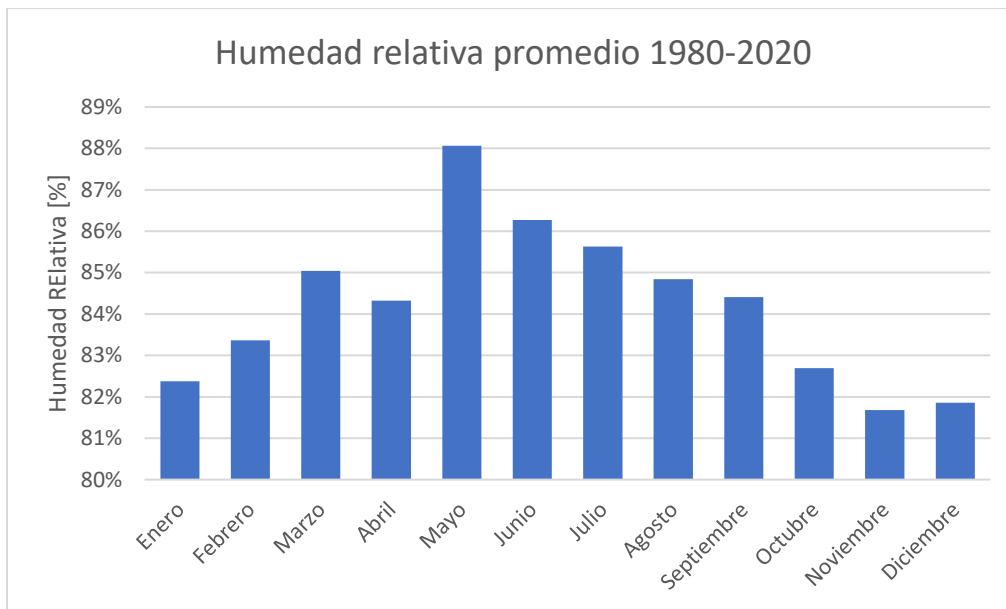


Figura 4.13: Humedad relativa promedio mensual

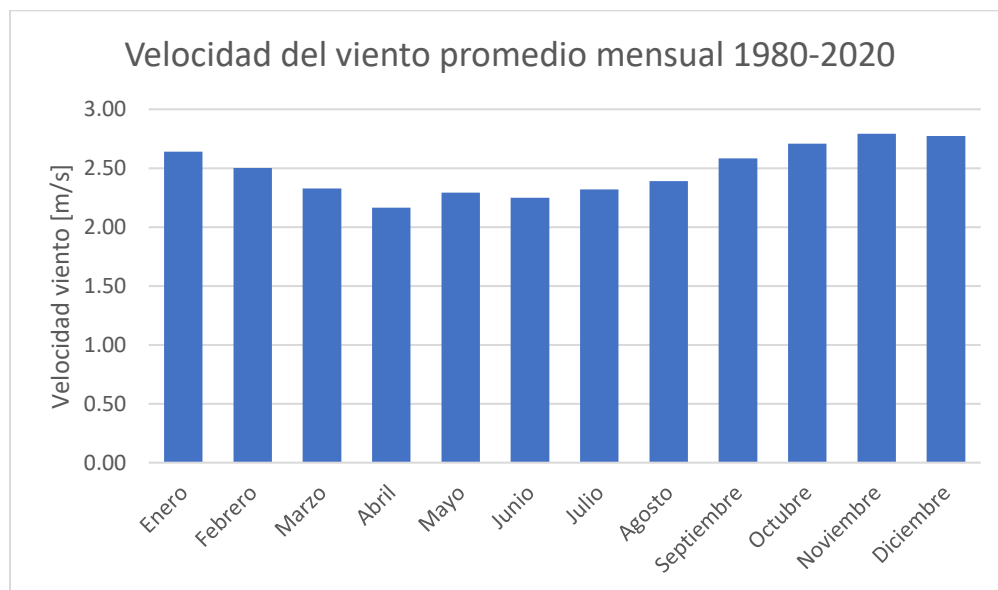


Figura 4.14 Velocidad del viento mensual

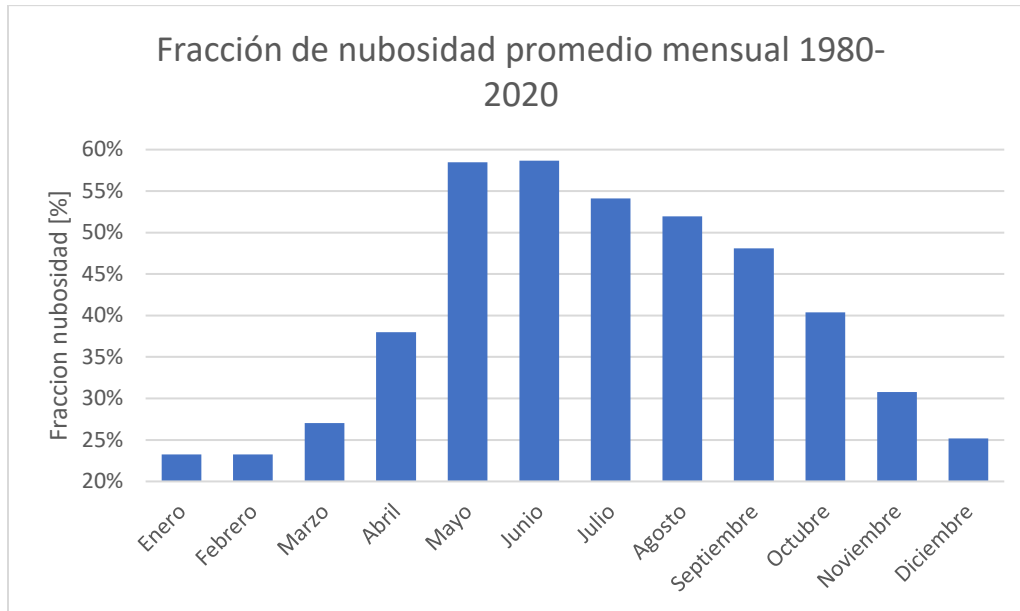


Figura 4.15: Fracción de nubosidad promedio mensual

4.5. Sitos de demanda y sectores de interés

Dentro de la cuenca se han identificado tres sitios de demanda que extraen el recurso hídrico superficial o subterráneo: Empresa Forestal Valparaíso S.A, Condominio Santa Augusta y Comité de Agua Potable rural de Quintay, Debido a la nula existencia de información pública por parte de las primeras dos entidades se estima la demanda hídrica a partir de supuestos y estimación de uso en base a imágenes satelitales.

4.5.1. Derechos de Agua en la cuenca

Para la obtención de los derechos de agua en la cuenca se crea una capa en formato shape a partir de las coordenadas de la base de datos de derechos de aguas en la página web de la DGA [34], luego se corta la capa por el polígono de la cuenca. Si bien existen algunos puntos de derechos de agua subterráneos que se encuentran fuera de la cuenca, estos corresponden a derechos de la Administradora Santa Augusta, por lo cual se consideran en el presente estudio.

La figura 4.16 muestra los derechos de agua considerados en la cuenca separados por: derechos de agua superficiales que se encuentran en la parte alta de la cuenca son todos propiedad de la empresa Forestal S.A con variación estacional, predominando su uso en los meses de invierno y los derechos de aguas subterráneos que se encuentran cerca de la desembocadura son; 1 propiedad de Comité de Agua potable rural de Quintay con 6 [l/s] de uso con ejercicio permanente y continuo y 6 para Administradora ó Golf Santa Augusta que suman 116 [l/s] de carácter permanente y continuo.

La figura 4.17 muestra la variación a lo largo del año de la cantidad de derechos de agua.

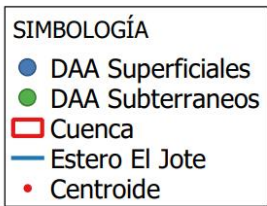
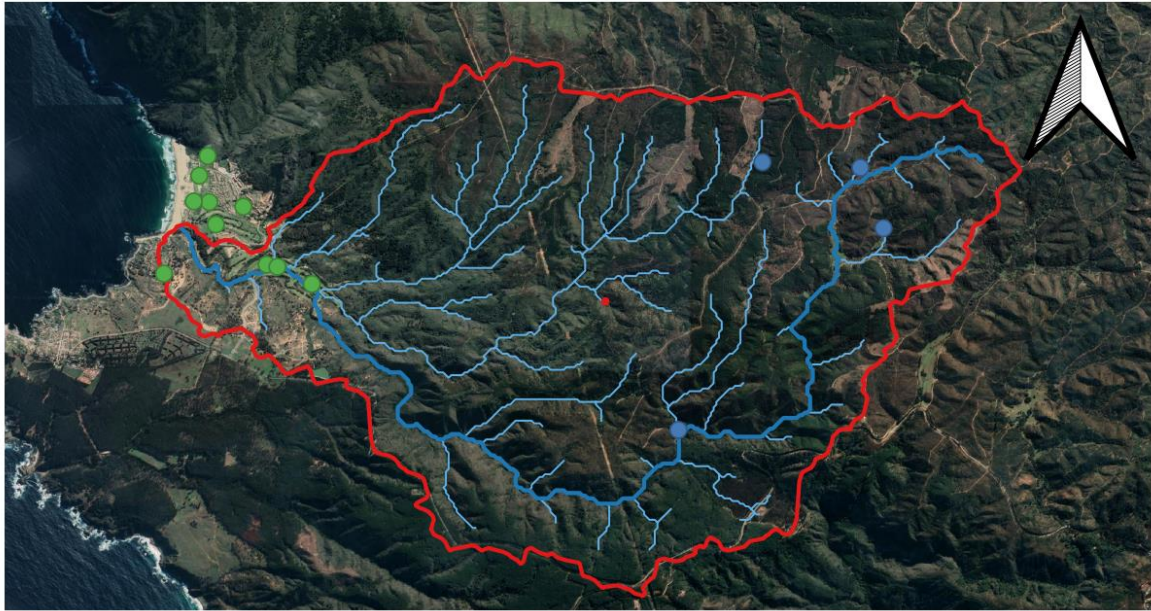


Figura 4.16: Ubicación geográfica de derechos de aguas en la cuenca Estero el Jote

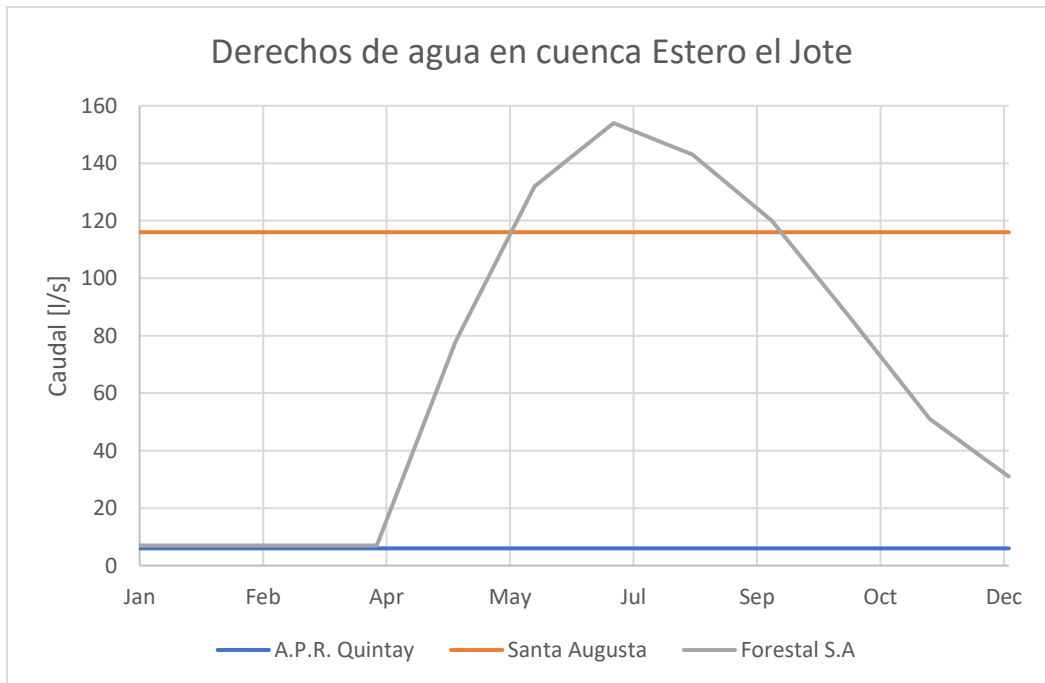


Figura 4.17: Derechos de agua en la cuenca Estero el Jote

4.5.2. Humedal El Jote

A metros de la playa de Quintay se encuentra el humedal el Jote (ver figura 4.18), estuario correspondiente a un cuerpo de agua donde la desembocadura del estero se abre al ecosistema marino. Cuando esto ocurre interactúa el agua “dulce” proveniente del estero con el agua salada de mar. Este humedal que es hogar de especies de flora y fauna nativa actualmente se encuentra deteriorado y en categoría de conservación vulnerable [41].

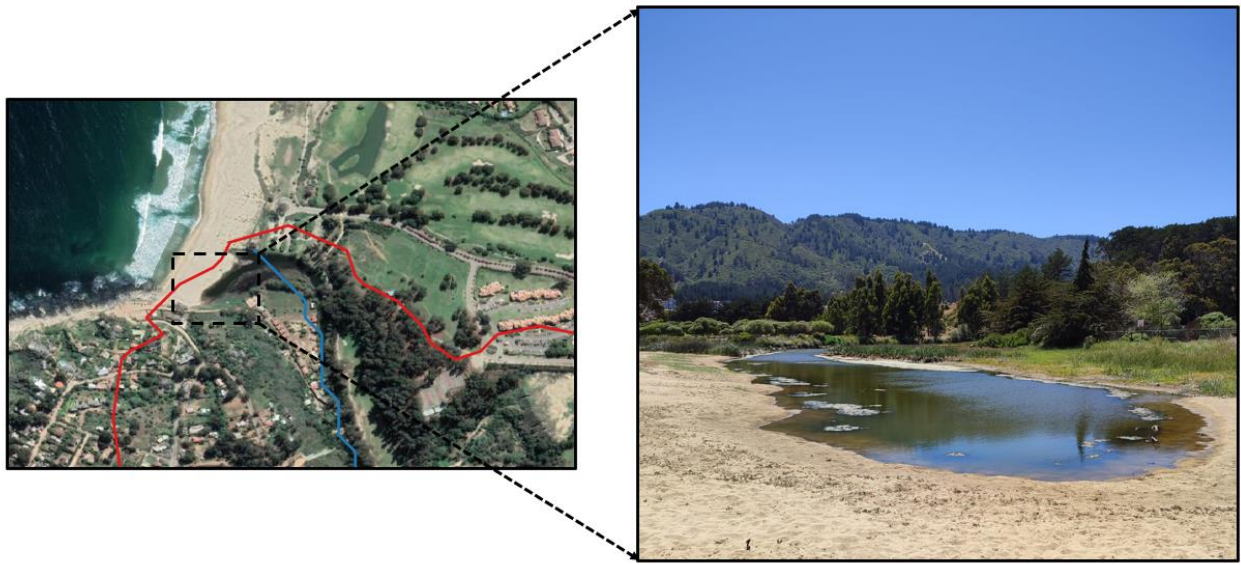


Figura 4.18: Humedal el Jote

Conocer los volúmenes de almacenamiento que ha tenido a lo largo del tiempo y como varían según el área que posee puede ser de gran ayuda para la calibración del modelo, debido que se podría separar el caudal de llegada a la desembocadura en caudal superficial y subsuperficial. Para lograr acercarse a los niveles de volumen que ha tenido el humedal el Jote se utilizan dos fuentes de información: Imágenes satelitales históricas de la plataforma Google Earth pro y mediciones de profundidad directas en secciones transversales estratégicas en el humedal. En la figura 4.19 se puede observar la imagen más reciente obtenida desde Google Earth pro correspondiente a septiembre del 2022 y la ubicación de las secciones transversales en las que se realizaron mediciones de profundidad.



Figura 4.19: Ubicación de mediciones de secciones transversales en humedal el Jote

El polígono rojo delimita el área del humedal cuyo valor es de 12099 [m²]. A partir de lo anterior se construye la línea que pasa por en medio del humedal que simula la unión de todos los puntos medios de cada sección transversal, la longitud de la línea mencionada es de 578 [m] y representa el largo del humedal. Las líneas azules son las secciones en las que se realizaron mediciones de profundidad, con 4 en total (En el punto 1 se realizaron dos mediciones debido a la existencia de un muro en la sección que permitió tener datos aguas arriba y aguas abajo de este) obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 4.6;

Tabla 4.6: Resultados de mediciones

Longitud [m]	Mediciones de profundidad [cm]				Perfil promedio [cm]
	1a	1b	2	3	
0	0	0	0	0	0
1	0	0	-15	-15	-7.5
2	0	0	-50	-32	-20.5
3	-45	-29	-68	-40	-45.5
4	-51	-70	-75	-50	-61.5
5	-63	-80	-82	-55	-70
6	-60	-62	-85	-87	-73.5
7	-80	-40	-72	-100	-73
8	-65	-52	-90	-90	-74.25

	Mediciones de profundidad [cm]				
Longitud [m]	1a	1b	2	3	Perfil promedio [cm]
9	-44	-30	-85	-85	-61
10	-32	-22	-68	-55	-44.25
11	-29	-10	-45	-40	-31
12	-14	0	-30	-38	-20.5
13	0	0	-30	-33	-15.75
14	0	0	-10	-20	-7.5
15	0	0	0	0	0

Los gráficos de cada medición de sección transversal se muestran en la figura 4.20:

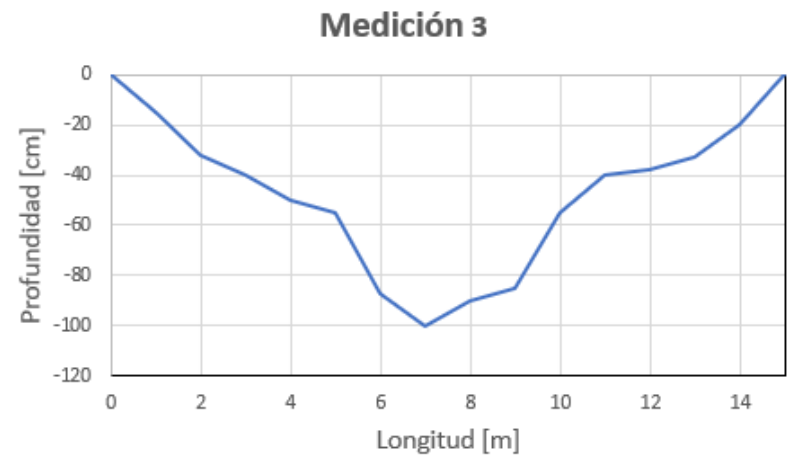
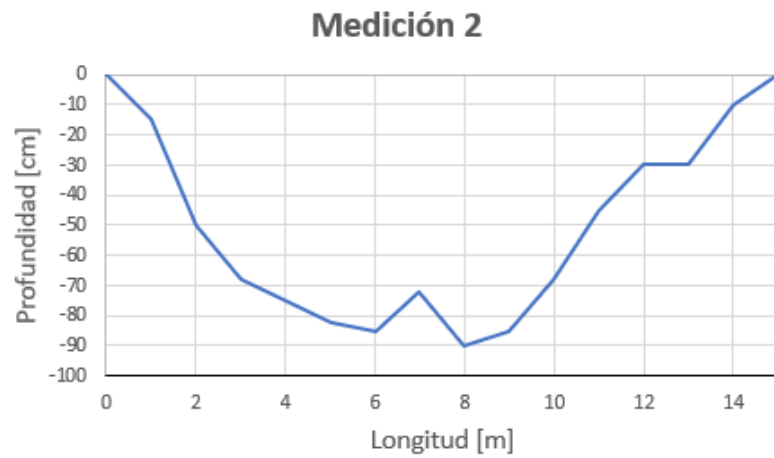
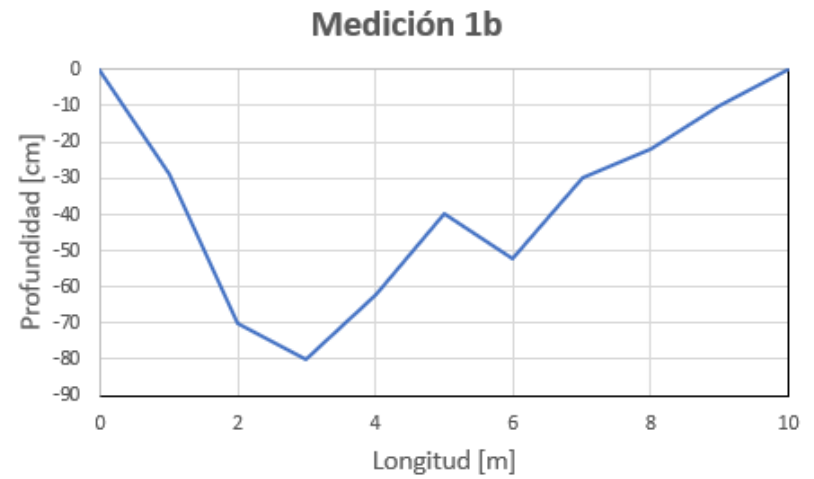
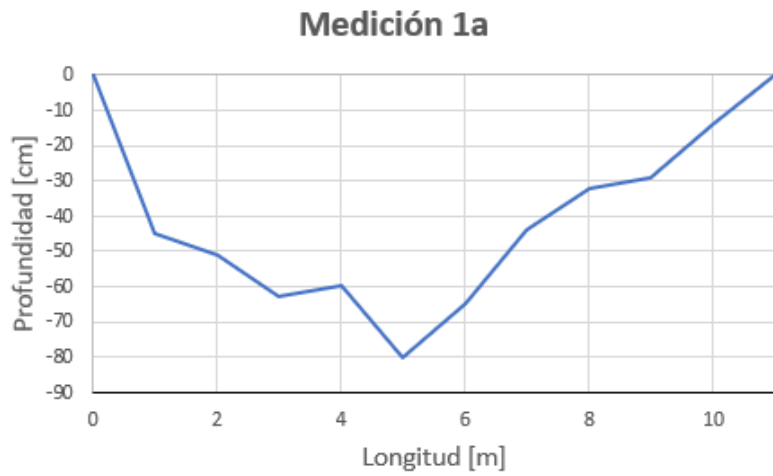


Figura 4.20: perfiles medidos

Se observa que las mediciones que se realizaron en secciones transversales son cortas en comparación al resto del humedal, por lo que se define el ancho promedio del humedal de la forma:

$$W_{prom} = \frac{A_s}{L} \quad (8)$$

Donde:

W_{prom} : Ancho promedio del humedal

A_s : Área superficial del humedal

L : Largo del humedal

Para la imagen en estudio, se obtiene un ancho promedio de 20,93 [m] el cual se redondea a 21 [m] y se extrapola el perfil promedio al ancho promedio en la figura 4.21.

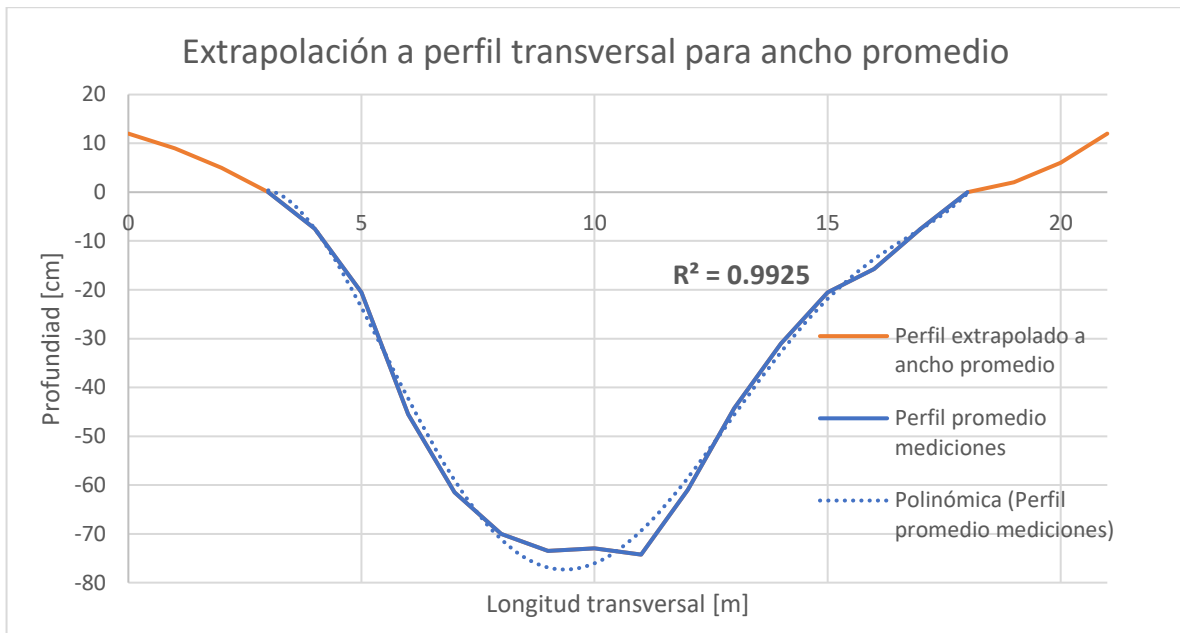


Figura 4.21: Extrapolación de perfil transversal promedio

Luego, desplazando el perfil extrapolado verticalmente a las coordenadas (0,0) y (21,0) se obtiene los resultados mostrados en la figura 4.22.

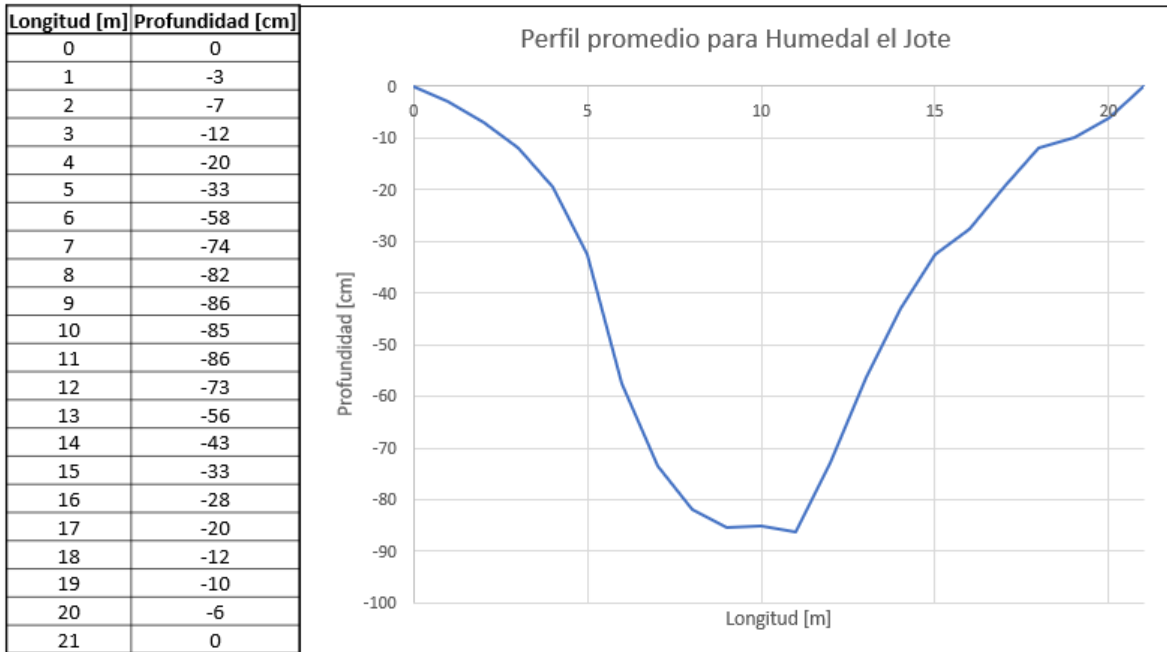


Figura 4.22: Perfil promedio para humedal el Jote

De la información anterior se puede obtener el ancho del humedal en función de la profundidad de la forma mostrada en la figura 4.23 y ecuación (9).

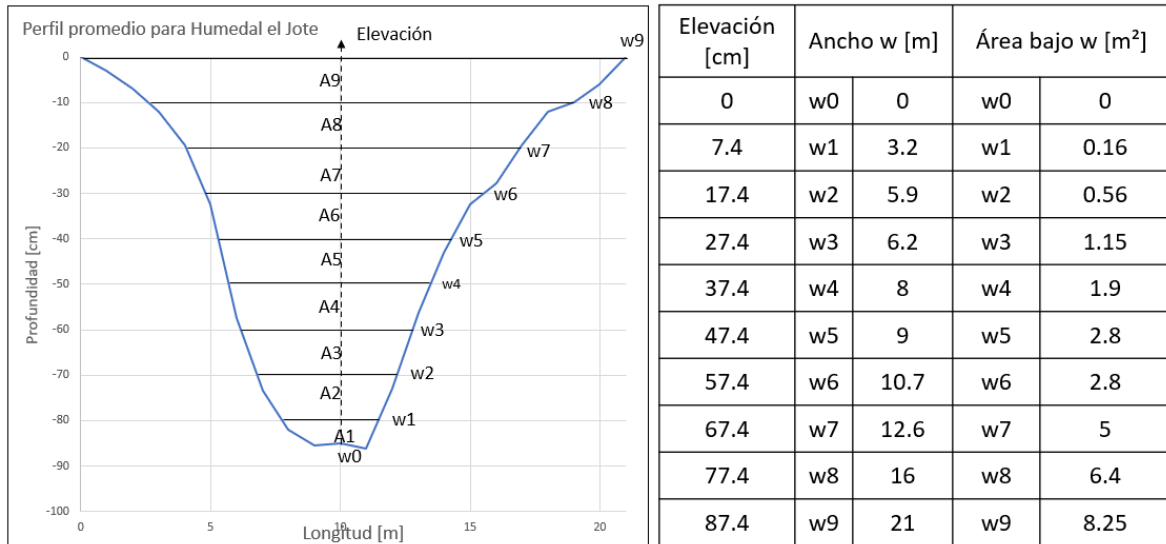


Figura 4.23: Ancho y área de sección transversal a partir de perfil promedio

Donde el área bajo cada dato de ancho promedio w se calculó con la siguiente expresión:

$$A_t \text{ bajo } w_n = \sum_{i=1}^n A_n; \text{ Para } n \in (1,9) \quad (9)$$

Donde:

A_t : Área de la sección transversal en [m²]

w_n : ancho en [m]

De lo anterior se puede obtener la curva Elevación-Ancho promedio, y Elevación-Área de sección transversal. El ancho promedio y el área de sección transversal son variables en función de la cantidad de agua almacenada que exista en algún instante en el humedal, es por ello que con el objetivo de proyectar las curvas por si existen crecidas de volumen almacenado se hará uso de la ecuación de línea de tendencia polinomial de grado 5 y polinomial de grado 3 para las curvas Elevación-Ancho promedio y Elevación-Área de sección transversal respectivamente debido a su buen ajuste en este caso.

Las figuras 4.24 y 4.25 muestran las curvas Elevación-Ancho promedio y Elevación- Área sección transversal respectivamente.

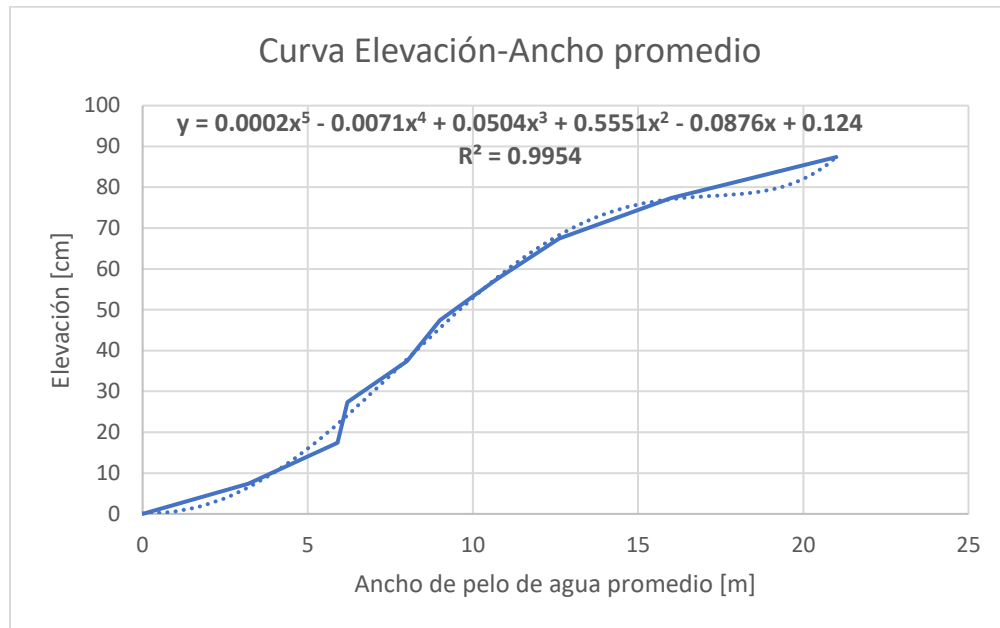


Figura 4.24: Curva Elevación-Ancho promedio

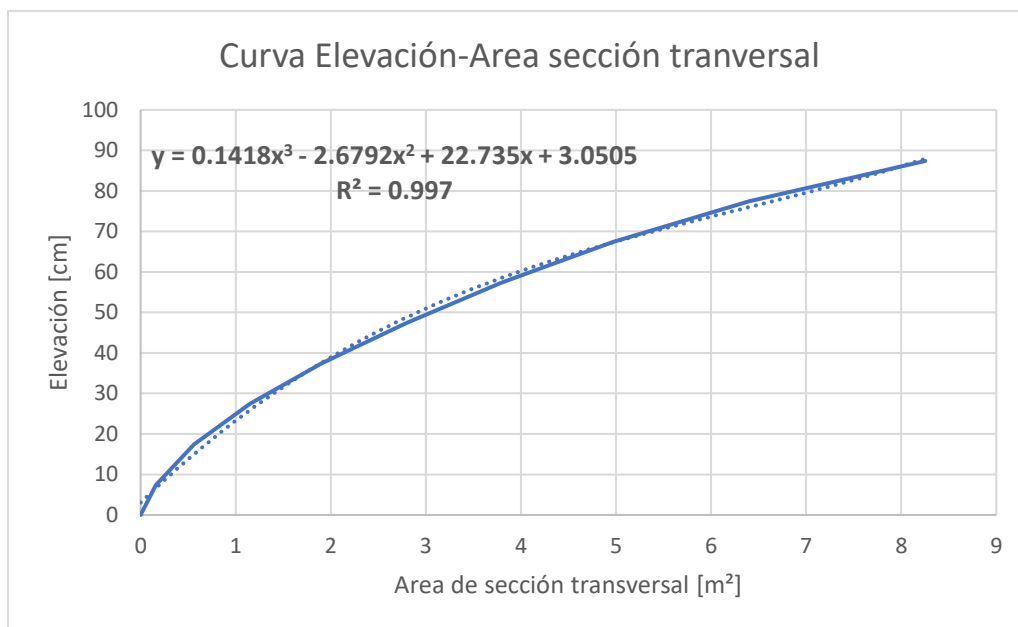


Figura 4.25: Curva Elevación-Área de sección transversal

Luego para la construcción de las curvas Elevación-Área superficial y Elevación-Volumen es necesario tener datos de área superficial y largo del humedal, por lo que se recurre a las imágenes históricas de Google earth pro (ver figura 4.26) para obtener dichos parámetros en las fechas disponibles.

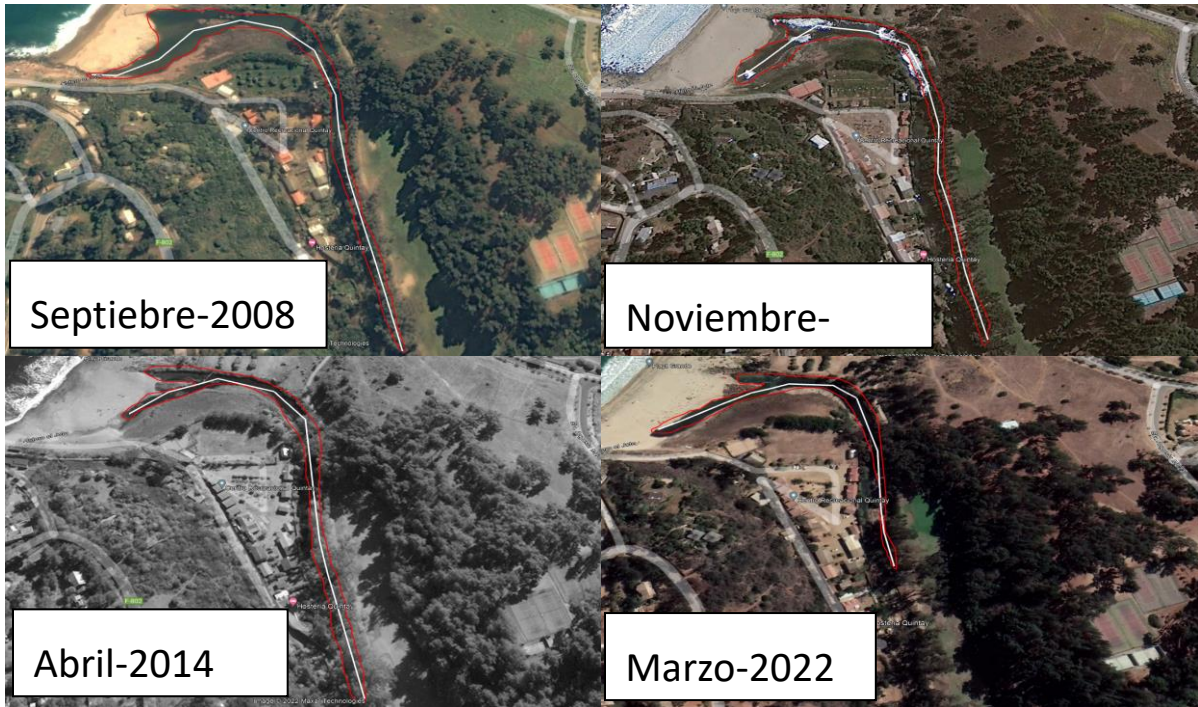


Figura 4.26: Ejemplos de imágenes satelitales históricas

Una vez obtenidos los datos de Área superficial y largo, se asocia el área superficial a un ancho promedio por medio de la ecuación de línea de tendencia mostrada en la figura 4.23, luego utilizando la ecuación de tendencia de la figura 4.24 se obtiene la relación entre el Área superficial y la elevación del humedal, obteniendo el grafico resultante en la figura 4.27:

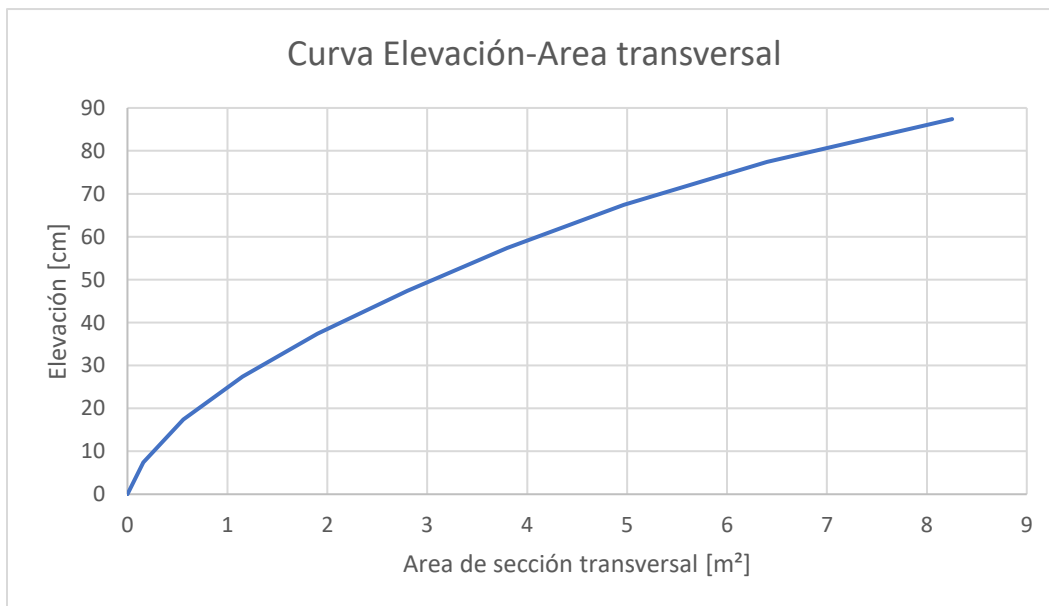


Figura 4.27: Curva Elevación-Área sección transversal

Realizado lo anterior, el volumen almacenado se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$V = A_t * L \quad (10)$$

Donde:

V : Volumen almacenado del humedal para la fecha de la imagen correspondiente.

A_t : Área sección transversal.

Finalmente, desde la ecuación (10) el volumen queda en función del área de la sección transversal, que a su vez es función de la elevación (ver figura 4.30) por lo que se obtiene una relación entre la altura y volumen del humedal mostrado en la figura 4.28.

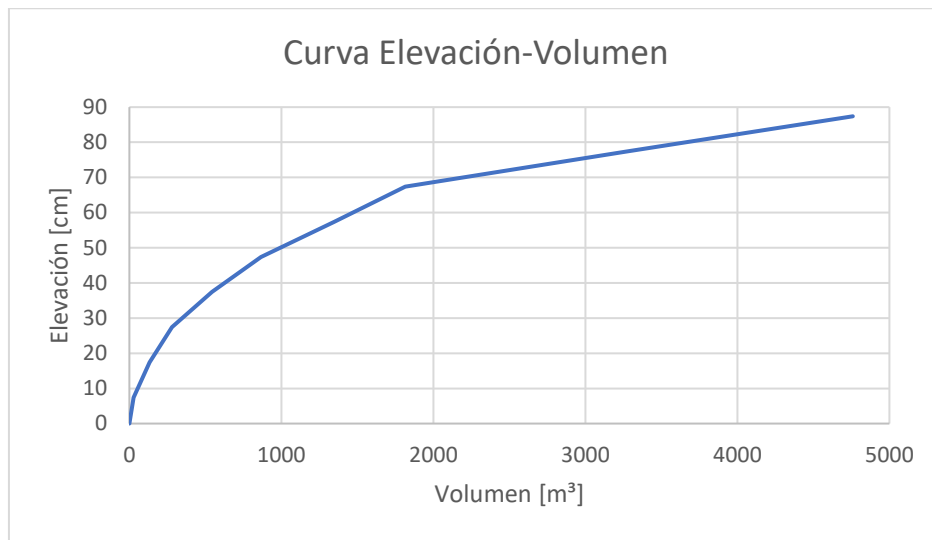


Figura 4.28: Curva Elevación-Volumen de almacenamiento

Finalmente, los datos de las imágenes disponibles se ordenan en la tabla 4.7:

Tabla 4.7: parámetros de imágenes históricas

Fecha	As [m ²]	L [m]	W [m]	Elev. [cm]	At [m ²]	V [m ³]
Sep-08	9371	540	17.4	77.9	6.6	3189
Apr-11	9619	517	18.6	78.8	6.7	3318
Sep-11	12289	592	20.8	85.8	7.9	4485
Nov-11	7430	486	15.3	76.2	6.3	2962
Jan-13	9812	508	19.3	80.0	6.9	3493
Feb-13	7396	498	14.9	75.5	6.2	2867
May-13	8573	537	16.0	77.1	6.4	3071
Apr-14	6596	458	14.4	74.5	6.0	2747
Aug-14	11373	560	20.3	83.3	7.5	4037
Mar-15	9214	496	18.6	78.8	6.7	3313
Aug-15	8980	498	18.0	78.3	6.6	3243
Feb-16	8193	536	15.3	76.2	6.3	2962
Feb-17	6367	459	13.9	73.1	5.8	2578

Fecha	As [m ²]	L [m]	W [m]	Elev. [cm]	At [m ²]	V [m ³]
Aug-17	9599	562	17.1	77.8	6.5	3171
Aug-18	8033	551	14.6	74.9	6.1	2797
Aug-19	7777	534	14.6	74.9	6.1	2792
Dec-19	6428	552	11.6	63.4	4.5	1681
Jan-21	3138	302	10.4	55.6	3.6	1193
Feb-21	4471	407	11.0	59.5	4.0	1415
Mar-22	4480	365	12.3	66.7	4.9	1947
Sep-22	12100	578	20.9	87.0	8.1	4712

Gráficamente se tienen los volúmenes de almacenamiento observados en la figura 4.29:

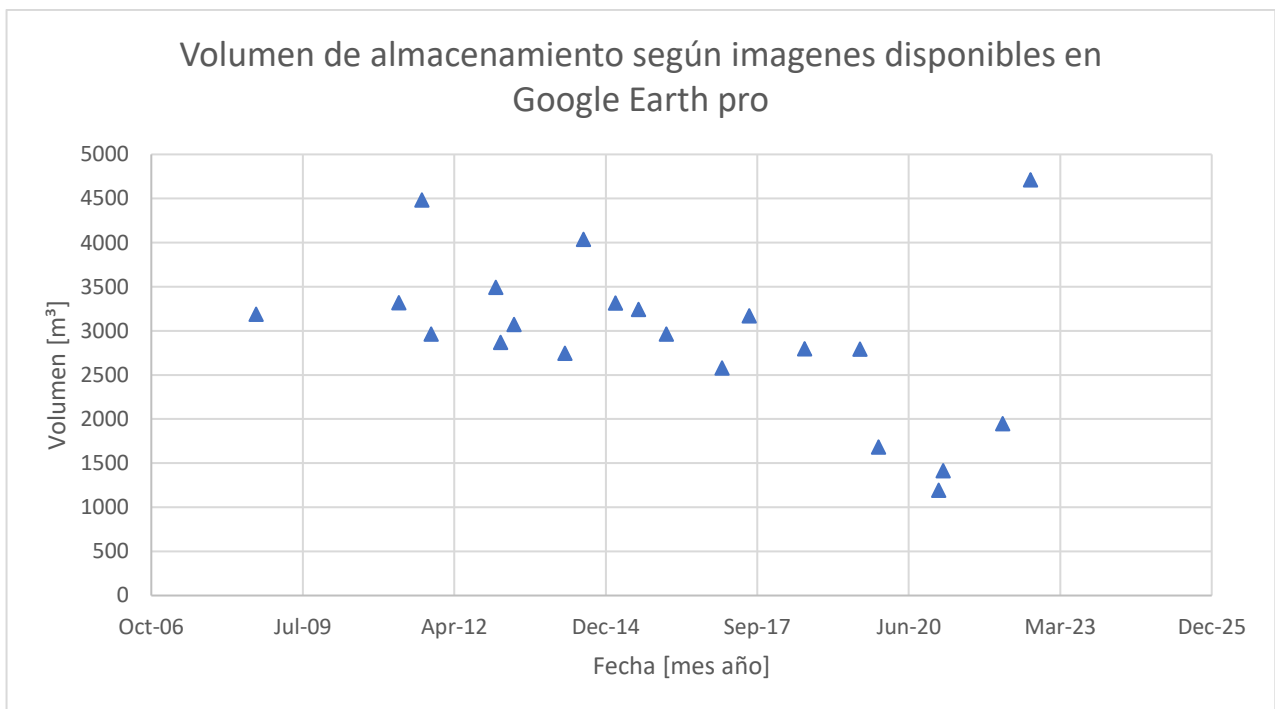


Figura 4.29: Volúmenes de almacenamiento observados

CAPÍTULO V

5. Obras de medición

En el presente capítulo se describe la metodología para el diseño, construcción, e instalación de las estaciones de medición piezométrica y pluviométrica.

El diseño y construcción de las estaciones que se describen en este capítulo fue un trabajo realizado en conjunto con el alumno Andrés Ruiz Medina, que estará presente en su trabajo de título a entregar: “Caracterización de los principales flujos hídricos desde y hacia el humedal de Tunquén mediante la instalación de sistemas de monitoreo de variables hidrológicas”. La metodología, diseño y construcción de los componentes electrónicos necesarios para el desarrollo de las estaciones fue guiado por el profesor Alejandro Weinstein.

5.1. Metodología para diseño, construcción e instalación de obra de medición piezométrica

5.1.1. Propuesta de diseño

Debido a que no existen escurrimientos superficiales en la cuenca a excepción de crecidas debido a días de intensas precipitaciones, se busca un diseño de medición piezométrica que integre las funciones de una estación pluviométrica de flujo superficial (para los periodos de crecidas) y de un pozo de monitoreo (para el resto del tiempo) con el fin de que se obtengan mediciones para el rango temporal requerido.

Para ello se propone el diseño que se muestra en la figura 5.1:

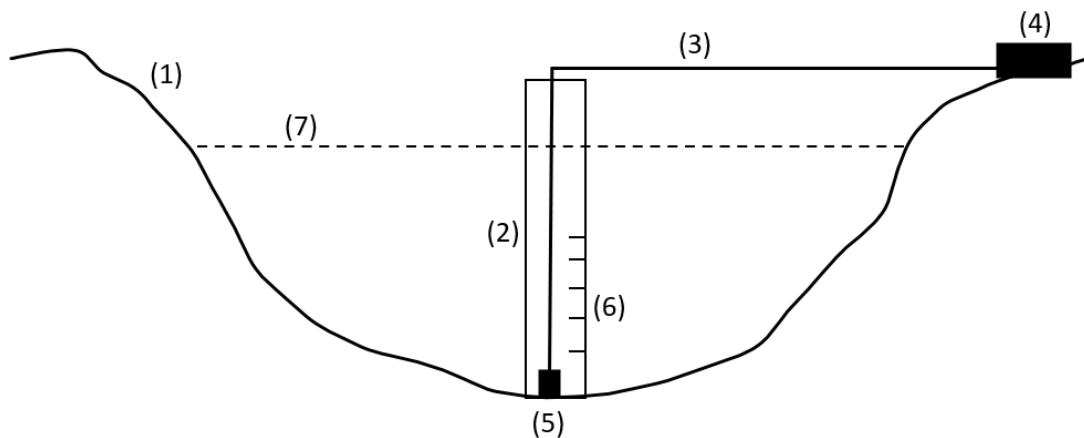


Figura 5.1: Esquema de diseño para estación piezométrica

El cual se describe a continuación:

- (1): Sección transversal del Estero el Jote.
- (2): Tubo que contiene el sensor de presión
- (3): Cable para sensor de presión.
- (4): Caja con componentes electrónicos para el registro y almacenamiento de datos.
- (5): Sensor de presión.
- (6): Rejillas que permiten el paso de agua
- (7): Esquema nivel de agua

Con el fin de reducir los costos del equipo se utiliza un sensor de presión de agua de salida analógica compatible con Arduino, el cual se muestra en la figura 5.2 y sus características en la tabla 5.1:



Figura 5.2: Sensor de presión de agua, imagen obtenida desde descripción de producto en página web Aliexpress.

Tabla 5.1: Características Sensor de presión de agua.

Marca	Genérica
Voltaje	Entrada: 5 [V]
	Salida: 0,5-4,5 [V]
Presión	Trabajo: 0-12 [bar]
	Rotura: 30 [bar]
Cable	1 [m]

El registro y almacenamiento de datos del cable estará a cargo de las placas Arduino y datalogger, las cuales se muestran en la figura 5.3.

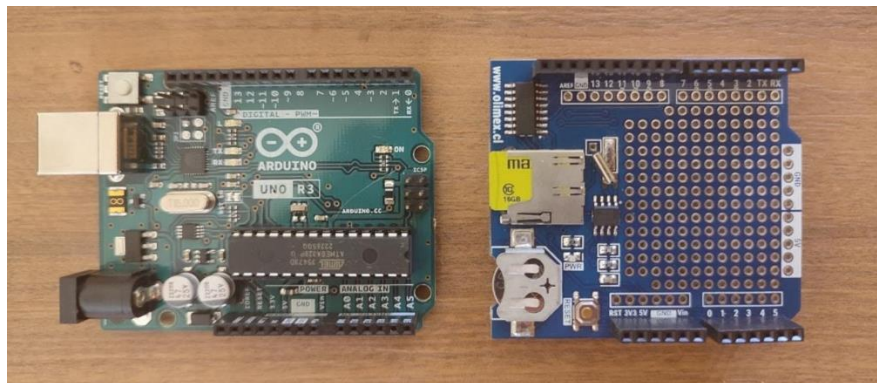


Figura 5.3: Placa electrónica Arduino y Datalogger utilizados, elaboración propia

5.1.2. Metodología de funcionamiento y programación

La obra debe ser capaz de realizar mediciones durante varios días seguidos, es por ello que con el objetivo de ahorrar batería se genera un código en el cual se registre 15 veces cada un segundo (Con la finalidad de generar un espacio estable de medición) y luego que en “modo ahorro” sin registrar durante una hora, es así que se pueden tener 360 datos para cada día que representen el nivel de cota piezométrico para 24 horas durante el día. Pruebas de funcionamiento (Ver código fuente en Anexo 1)

Como la longitud del cable no es suficiente para el sistema propuesto, se realiza una extensión sencilla con cable tipo cordón tripolar. Además, con el fin de comprobar el funcionamiento se realizó una prueba en laboratorio con mediciones cada 10 [cm] (Ver figura 5.4).

La prueba consistió en marcar el cable cada 10 [cm], conectarlo a una fuente de poder y sumergir el sensor paulatinamente dentro de un tubo de PVC lleno con agua hasta 1,5 [m] de profundidad. Fue posible medir el valor de voltaje que registraba el sensor a cada nivel de profundidad con u tester, los resultados de la prueba se muestran en la tabla 5.2 y figura 5.5.



Figura 5.4: Prueba de funcionamiento de sensor de presión de agua y extensión del cable.

Tabla 5.2: Resultados prueba de funcionamiento.

Altura [cm]	Voltaje [MV]
0	0,505
10	0,508
20	0,512
30	0,516

Altura [cm]	Voltaje [MV]
40	0,520
50	0,524
60	0,528
70	0,532
80	0,537
90	0,541
100	0,544
110	0,547
120	0,551
130	0,555
140	0,560
150	0,563

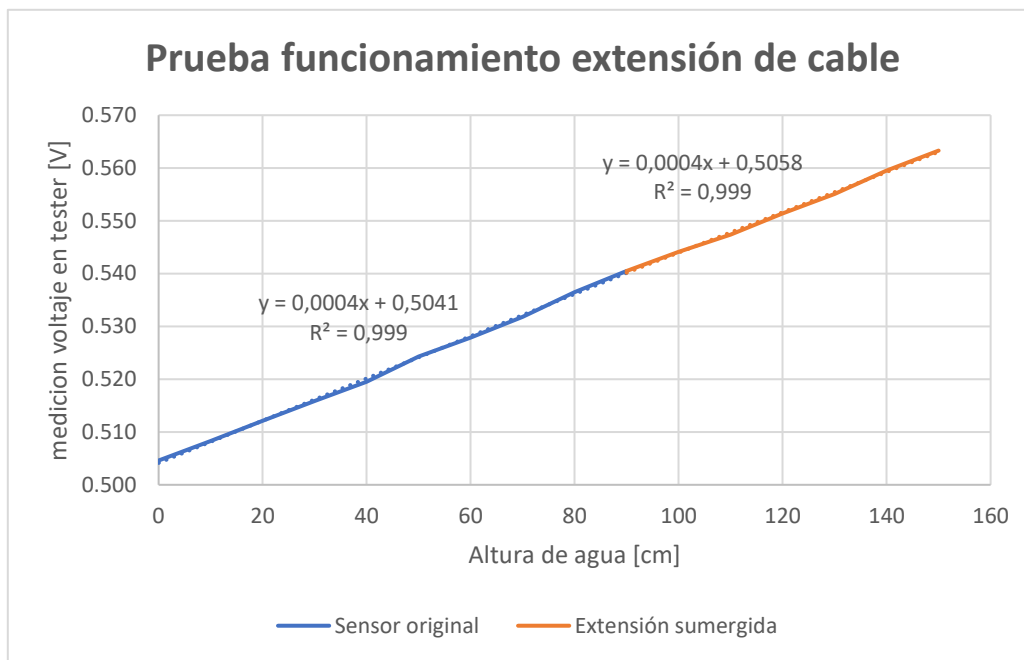


Figura 5.5: Gráfico de prueba de funcionamiento.

Se observa que el coeficiente de determinación es adecuado por lo cual la extensión funciona. Además, se conoce que la relación entre la altura de agua medida y el voltaje de salida entregado por el tester es lineal.

5.1.3. Instalación

Para la instalación en terreno se utilizaron pilas alcalinas para la alimentación, por lo que los valores de salida serán en función del ADC y no voltaje, es por ello que antes de la instalación del sistema es necesario realizar una prueba en terreno para definir la recta (Valor de salida ADC-Altura de agua).

El lugar de instalación está en una zona de trabajos del SSR Quintay de acceso privado para evitar posibles problemas por interacción de personas. El piezómetro instalado y la ubicación geográfica de este con respecto al humedal el Jote se muestran en las figuras 5.6 y 5.7 respectivamente.



Figura 5.6: Piezómetro instalado en Estero el Jote

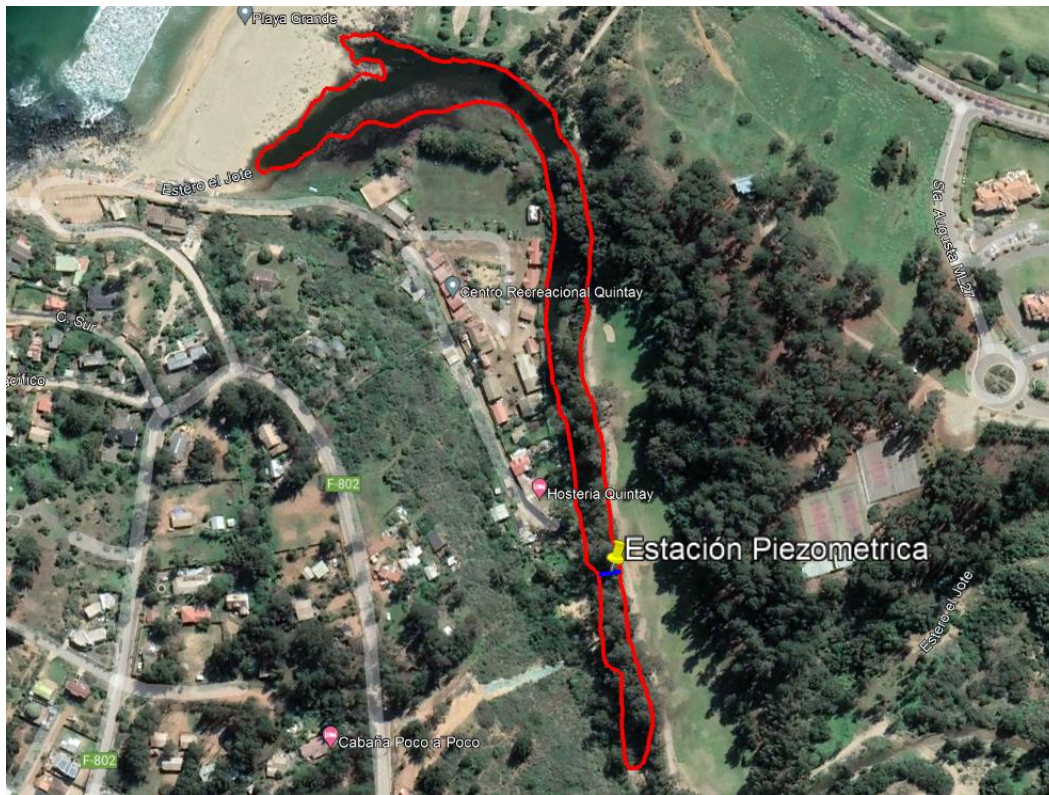


Figura 5.7: Ubicación geográfica de Estación piezométrica

Según las mediciones previas a la instalación, se obtuvieron 15 datos con el sensor no sumergido, obteniendo un promedio de valor de salida ADC de 107.87. Para el sensor sumergido a 81 [cm] de profundidad el valor ADC promedio fue de 111.93, por lo que la recta de funcionamiento es la indicada en la figura 5.8:

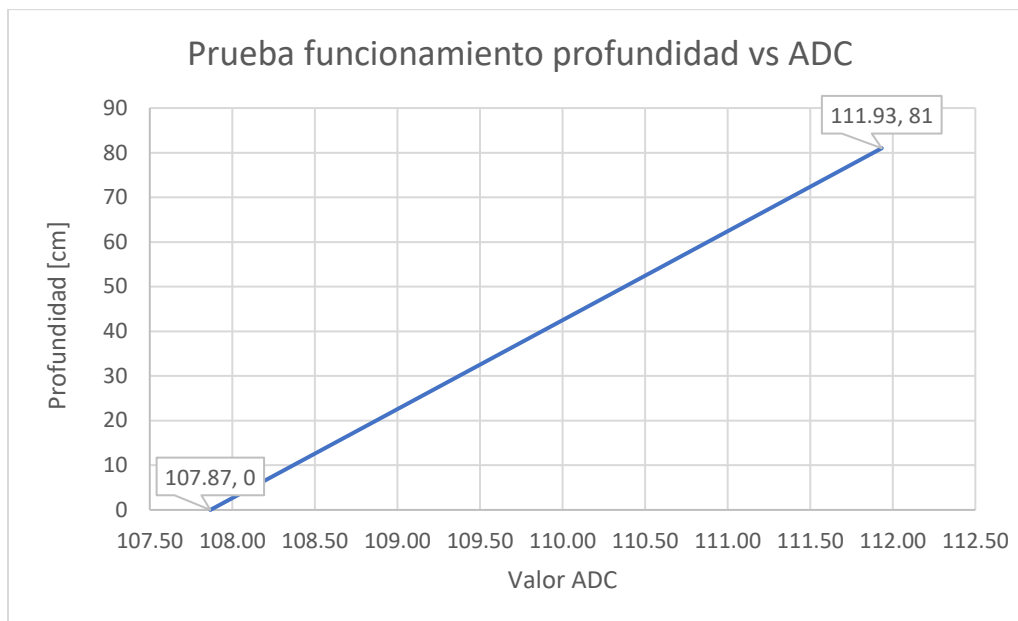


Figura 5.8: Recta de funcionamiento relación salida ADC y profundidad

5.1.4. Resultados

El dispositivo quedó instalado durante 32 horas desde el día 2 de diciembre de 2022, una vez promediados los 15 datos para cada hora se obtuvieron las variaciones en la profundidad del cauce mostradas en la figura 5.9:

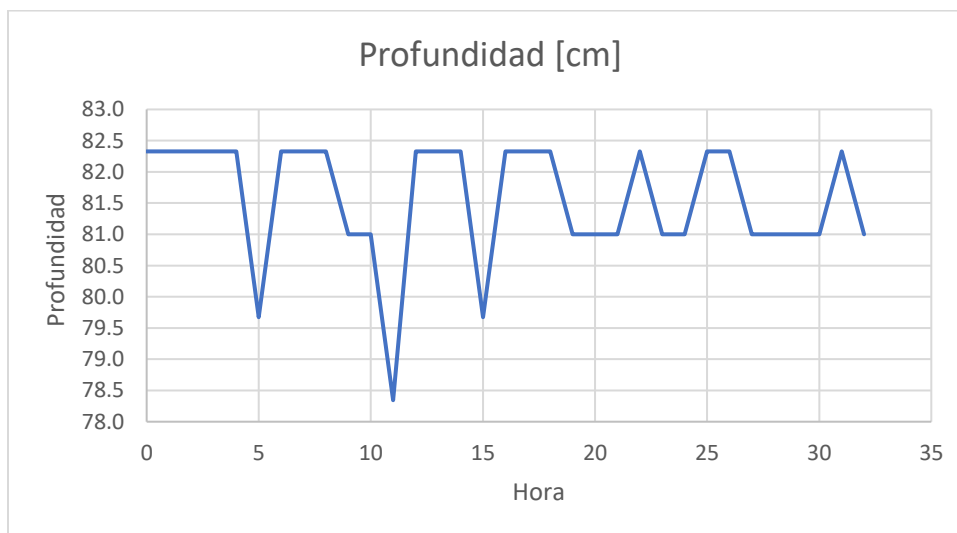


Figura 5.9 Resultados de mediciones de estación piezométrica

Los resultados obtenidos muestran cambios de hasta 4 [cm] de elevación de almacenamiento, lo que es muy poco probable debido a que no existieron eventos climáticos que pudiesen afectar dicho parámetro en el rango temporal de funcionamiento. Los cambios registrados se atribuyen a la precisión del sensor de presión, por lo que se recomienda acoplar un sistema de amplificación de voltaje, que permita transformar los datos de salida ADC en un rango de salida acotado a las posibles elevaciones de almacenamiento y con ello obtener mayor precisión en las mediciones. Los costos asociados al diseño y construcción de la estación se presentan en anexo 2.

5.2. Metodología para diseño, construcción e instalación de obra de medición pluviométrica

5.2.1. Propuesta de Diseño

Entre los principales componentes presentes en un modelo de balance hídrico se encuentran las precipitaciones, las cuales serán medidas a través de la implementación de una estación de medición de bajo costo que contará con un pluviómetro y un sistema “datalogger” capaz de registrar y almacenar datos. La función principal de esta estación es la medición y registro de la cantidad de agua caída en los eventos de precipitación en la zona.

El pluviómetro seleccionado corresponde a un pluviómetro de doble cubeta basculante, el cual será impreso con tecnología 3D y se instalará junto con una caja protectora que contendrá un datalogger en un sitio que brinde la mayor seguridad y condiciones aptas para la medición posibles. El datalogger será el encargado de registrar los datos con fecha y hora, y almacenarlos en una tarjeta microSD, para su posterior obtención en terreno. El sistema de funcionamiento será alimentado mediante corriente.

El diseño se eligió desde la plataforma de libre acceso thingiverse [35], web online interactiva dedicada a la creación y publicación de archivos de diseño digital creados por los usuarios de la comunidad, y proporciona archivos “.stl” para impresión 3D previamente modelados en software. Específicamente se eligió el pluviómetro “Tipping Bucket Rain Gauge for HT DN 110 pipe” que se presenta detalladamente en la figura 5.10.

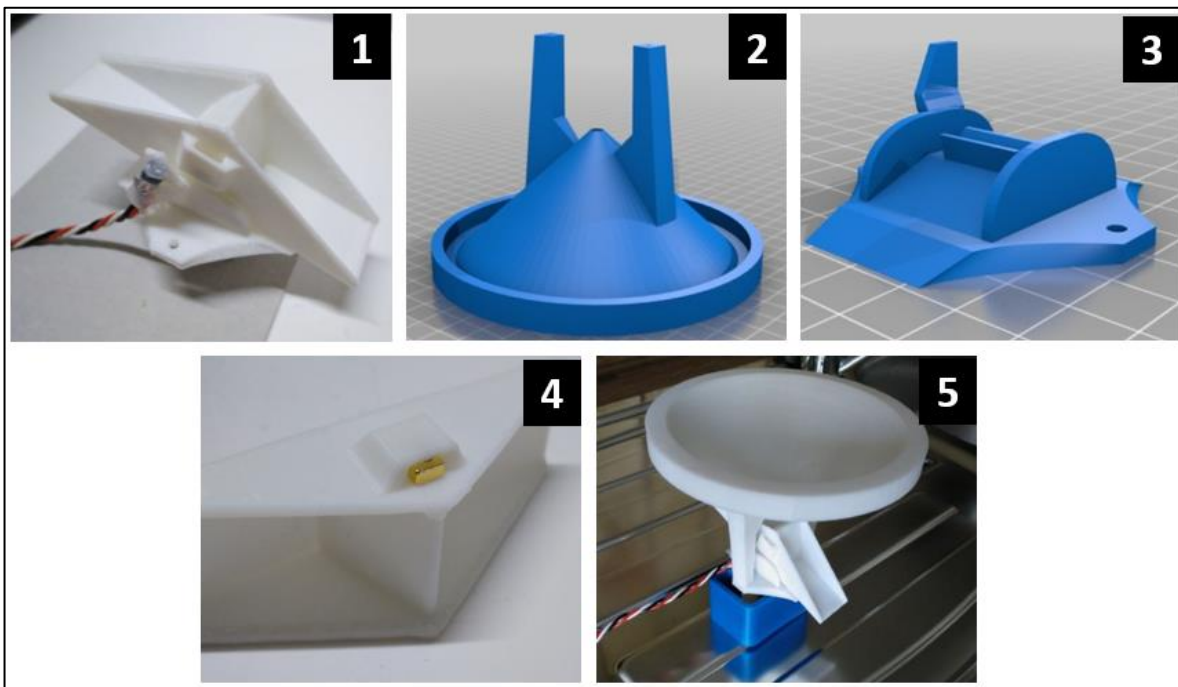


Figura 5.10: Componentes del sistema pluviométrico [35].

- 1: Cubeta basculante.
- 2: Embudo del pluviómetro.
- 3: Base de la balanza que permite los cambios de posición de esta.
- 4: Imán de neodimio integrado para la generación del campo electromagnético.
- 5: Pluviómetro completo.

Luego se imprimió el pluviómetro en dependencias de Fablab UV obteniendo el resultado de la figura 5.11:



Figura 5.11: Pluviómetro impreso en 3D

5.2.2. Metodología de funcionamiento y programación

El pluviómetro cuenta con un embudo encargado de captar el agua y dirigirla a las cubetas de este. Las cubetas basculantes poseen un volumen de llenado y de activación del mecanismo. Además, en la parte exterior del pluviómetro se localiza un imán de neodimio encargado de generar un campo magnético y un sensor de efecto hall encargado de reconocer este campo magnético. Este sensor está conectado mediante cables a una placa Arduino junto con el módulo logger ubicada en una caja de PVC bajo la estructura del pluviómetro. Todo el sistema va inserto en una caja protectora ó tubo de PVC sanitario de 110 [mm] de diámetro.

En presencia de precipitaciones, el agua captada por el embudo es dirigida las cubetas del pluviómetro, cuando el volumen de una cubeta se llena, se realizará un movimiento en el mecanismo de bascula, lo que produce un pulso generado, luego el sensor de efecto hall reconoce el campo magnético producto de la aproximación del imán de neodimio inserto en el mecanismo del pluviómetro, funcionando como un interruptor magnético.

Este pulso es enviado y procesado por la placa de Arduino, la cual al reconocer el pulso y junto al módulo logger, registra la fecha y hora del pulso en una tarjeta de memoria SD. Los registros medidos se deben presentar en formato texto y contener los datos de registro de pulso, y fecha y hora asociada a cada pulso.

El sistema debe ser capaz de identificar los movimientos en la cubeta basculante, para ello se define mediciones cada 1 segundo, estas mediciones son almacenadas por el datalogger y son entregadas en formato .txt con variaciones de 0 y 1 (según posición de la cubeta) obteniendo como resultado los valores del reporte mostrado en la figura 5.12. El código fuente del pluviómetro se presenta en anexo 3.

Valor	Time
0	7/9/2022 11:4:26
0	7/9/2022 11:4:27
0	7/9/2022 11:4:28
0	7/9/2022 11:4:29
0	7/9/2022 11:4:30
0	7/9/2022 11:4:31
0	7/9/2022 11:4:32
0	7/9/2022 11:4:33
0	7/9/2022 11:4:34
0	7/9/2022 11:4:35
0	7/9/2022 11:4:36
0	7/9/2022 11:4:37
0	7/9/2022 11:4:38
0	7/9/2022 11:4:39
1	7/9/2022 11:4:40
1	7/9/2022 11:4:41
1	7/9/2022 11:4:42
1	7/9/2022 11:4:43
0	7/9/2022 11:4:44
0	7/9/2022 11:4:45
0	7/9/2022 11:4:46
1	7/9/2022 11:4:47
1	7/9/2022 11:4:48
0	7/9/2022 11:4:49

Figura 5.12: Reporte de registros del pluviómetro

Los cambios de posición fueron identificados y se muestran en rojo, según las pruebas de laboratorio el pluviómetro tiene un radio de 11 [cm] y la báscula cambia de posición con un volumen de 2,5 [cm³] por lo que los milímetros de lluvia registrados al día se consiguen con la expresión:

$$[mm]_{\text{agua caída}} = \frac{\text{Volumen [mm}^3]}{\text{Area [mm}^2]} = \frac{2,5 * 1000 * N^{\circ}\text{cambios de posición}}{\pi * 55^2} \quad (11)$$

5.2.3. Pruebas de funcionamiento

En la primera fase de impresión se debió modificar las dimensiones de la ranura que contiene el imán de neodimio debido a que el imán conseguido en el mercado es de diferentes medidas que el mostrado en la figura 5.11. Lo anterior fue posible gracias a una modificación en el modelo 3D realizada en dependencias de FABLAB UV.

Previo a la instalación se realizó una prueba, la cual consistió en conectar el sistema, ingresar agua al embudo de forma paulatina simulando una lluvia, contar los movimientos de la cubeta basculante y almacenar el agua caída en un recipiente de masa conocida. Luego de repetir la prueba cuatro veces, se midió la masa del agua en una balanza digital, obteniendo resultados de 25, 25, 26 y 25 [gr], luego redondeando a el promedio a 25 [gr] y considerando una densidad de 1 [gr/ml] se obtiene un volumen de 25 [ml] para los 10 movimientos de la cubeta, lo que representan 2,5 [ml] necesarios para el movimiento de cubeta (Valor utilizado en ecuación 11).

5.2.4. Instalación

La instalación del pluviómetro debe realizarse cercano a la cuenca, en una zona de altura que permita una libre captación de las precipitaciones, y que la captación no sea interrumpida por elementos externos como copas de árboles o estructuras cercanas. Además, se ha considerado instalarlo en algún terreno privado para evitar problemas de vandalismo. La instalación se realizó en la oficina del SSR Quintay, la estación instalada y su ubicación geográfica se muestran en las figuras 5.13 y 5.14 respectivamente.



Figura 5.13: Pluviómetro instalado en oficinas SSR Quintay



Figura 5.14: Ubicación geográfica de Estación pluviométrica

Si bien el recipiente que contiene los elementos electrónicos funcionó, este podría ser débil a largo plazo, debido a desgaste y problemas para sostenerse, además depende de cintas adhesivas para sellar los espacios entre el pluviómetro y el recipiente, es por ello que luego del periodo de funcionamiento se diseñó una caja impermeable compatible y del mismo material que el pluviómetro (ver figura 5.15) con la finalidad de resolver las imperfecciones mencionadas.



Figura 5.15: Caja impermeable con pluviómetro integrado

5.2.5. Resultados

El pluviómetro fue instalado desde el día 05/08/2022 y registró 5 eventos de precipitación hasta el día 07/09/2022, los datos fueron comparados con la estación meteorológica más cercana Lago Peñuelas obteniendo los resultados de la figura 5.16:

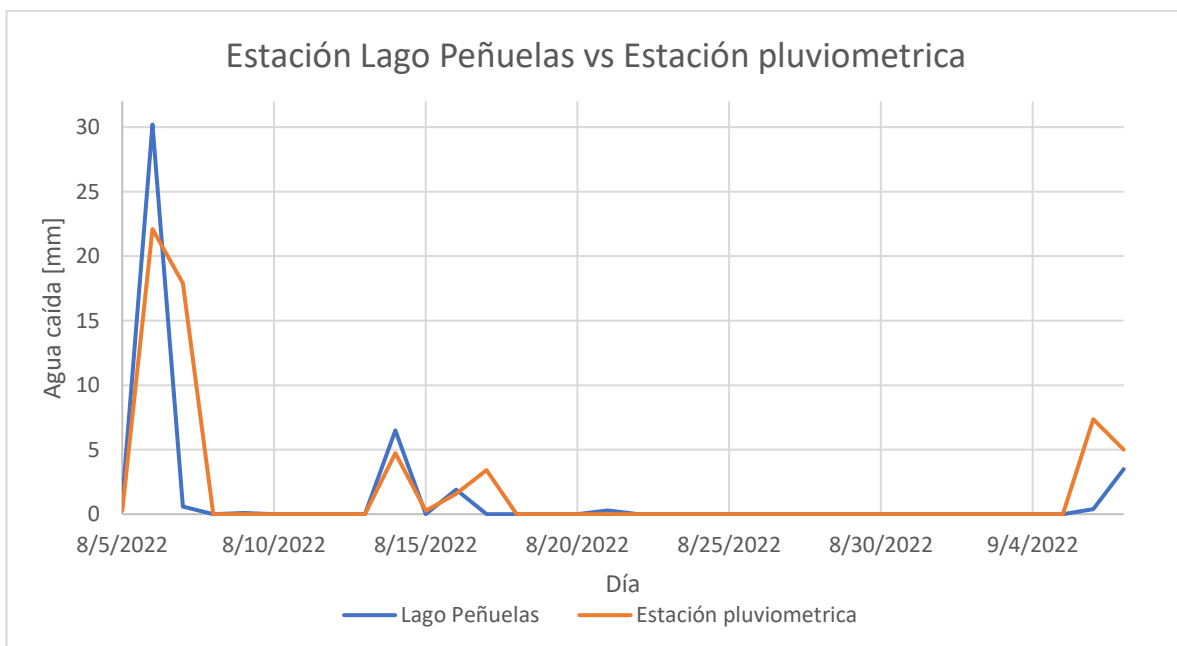


Figura 5.16: Resultados pluviómetro

Se observa que los 5 eventos fueron registrados con valores similares, la diferencia entre estos valores es de un 40%. Los costos asociados al diseño y construcción de la estación se presentan en anexo 4.

CAPÍTULO VI

6. Demandas de Agua

El presente capítulo tiene como objetivo describir y cuantificar las demandas de agua en la cuenca, se incluyen las extracciones para consumo del pueblo de Quintay, condominio Santa Augusta y empresa Forestal S.A.

6.1. Demandas de Comité de Agua potable rural del Quintay

6.1.1. Población abastecida

De acuerdo con la información correspondiente a los últimos tres censos realizados en Chile, la localidad de Quintay ha experimentado un aumento poblacional significativo tal como lo muestra la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Resultados últimos tres Censos en Quintay

Población en Quintay			
Año de Censo	Habitantes	Variación [hab/año]	Variación [%/año]
1992	541	-	-
2002	772	23	4,27%
2017	924	10	1,31%

Considerando el aumento poblacional en base a estos tres censos y utilizando el método de interés simple se obtienen las siguientes expresiones para la obtención de la cantidad de habitantes por cada año para el rango temporal de interés.

$$N^{\circ}hab(n) = hab_{c_1} + \frac{hab_{c_2} - hab_{c_1}}{10} * (n - 1992) \quad \forall n \in [1993 - 2001] \quad (12)$$

$$N^{\circ}hab(n) = hab_{c_2} + \frac{hab_{c_3} - hab_{c_2}}{15} * (n - 2002) \quad \forall n \in [2003 - 2016] \quad (13)$$

Donde:

$N^{\circ}hab(n)$: Número de habitantes para año “n”.

hab_{c_i} : Habitantes registrados para Censo “i” con $i = 1, 2$ y 3 correspondientes a los censos 1992, 2002 y 2017 respectivamente.

n : Año.

Se obtiene el gráfico de la figura 6.1 para los años entre 1992 y 2017:

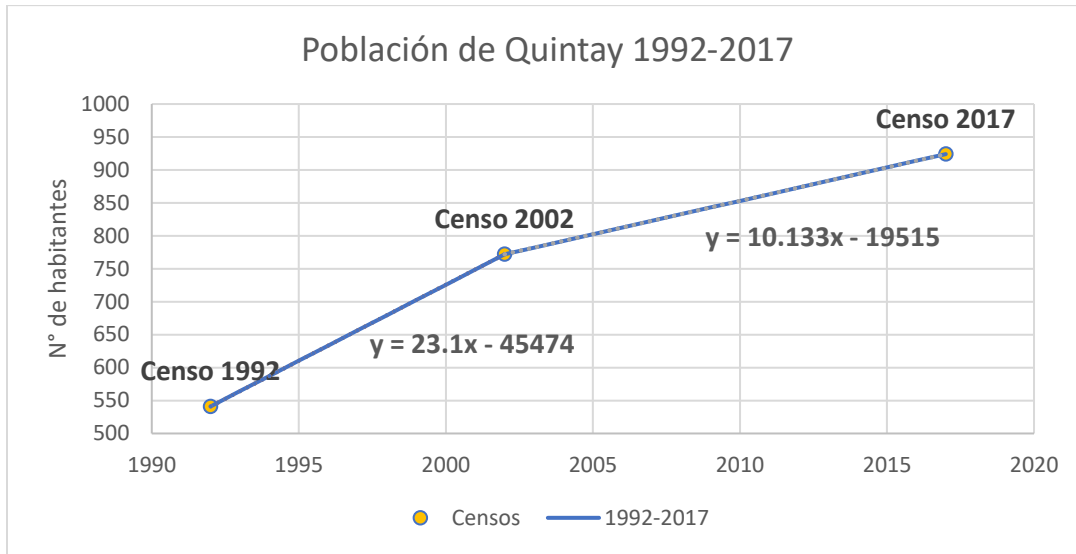


Figura 6.1: Grafico de población entre 1992 y 2017 para Quintay

Con las ecuaciones de línea de tendencia para el tramo 1992-2002 y 2002-2017 presentadas en el grafico anterior se obtiene la regresión y proyección de habitantes para los años 1980-1991 y 2018-2050 respectivamente, expresada gráficamente en la figura 6.2.

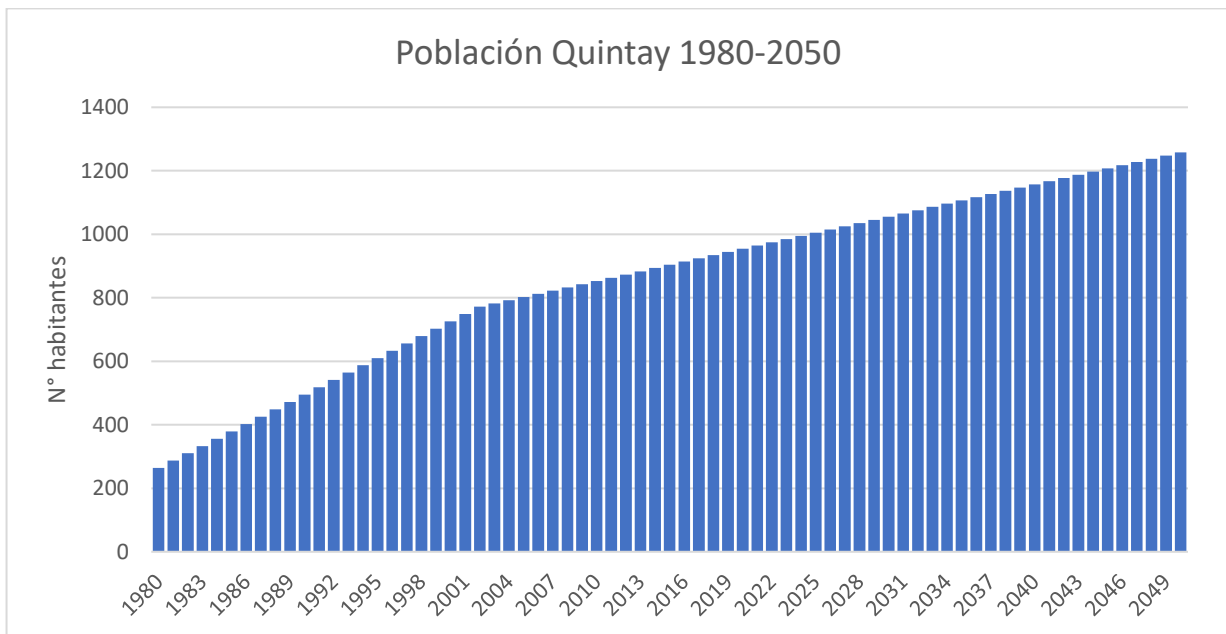


Figura 6.2: Regresión y proyección de población 1980-2020

6.1.2. Dotación

El artículo 1 del decreto 743 reformado el 16 de Julio de 2005 fija la demanda promedio anual para sistemas de agua potable rural como 79 [m³/hab./año], sin embargo, desde el comité de agua potable rural de Quintay ó SSR Quintay se obtuvo información correspondiente al volumen de agua abastecido desde Enero de 2020 a Agosto 2022 ordenada en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Volumen abastecido por SSR Quintay

Volumen abastecido en m ³			
Mes	2020	2021	2022
Enero	5287	5049	5609
Febrero	6153	4248	5035
Marzo	4499	5177	5340
Abril	3282	3748	3768
Mayo	4113	3263	3443
Junio	3105	3743	4200
Julio	3030	3652	3959
Agosto	3410	3598	3735
Septiembre	4305	5049	-
Octubre	3497	4012	-
Noviembre	3967	4409	-
Diciembre	5311	5554	-

Para obtener la variación estacional del volumen de agua abastecido por el SSR se calculan los valores faltantes como los promedios mensuales de los años 2020 y 2021, los cuales se muestran en amarillo en la tabla 6.3.

Tabla 6.3: Variación mensual de volumen abastecido por SSR Quintay

Volumen abastecido en m ³					
Mes	2020	2021	2022	Promedio	% respecto del total
Enero	5287	5049	5609	5315	10.3%
Febrero	6153	4248	5035	5145	10.0%
Marzo	4499	5177	5340	5005	9.7%
Abril	3282	3748	3768	3599	7.0%
Mayo	4113	3263	3443	3606	7.0%
Junio	3105	3743	4200	3683	7.1%
Julio	3030	3652	3959	3547	6.9%
Agosto	3410	3598	3735	3581	6.9%
Septiembre	4305	5049	4677	4677	9.1%
Octubre	3497	4012	3755	3755	7.3%
Noviembre	3967	4409	4188	4188	8.1%
Diciembre	5311	5554	5433	5433	10.5%
Total	49959	51502	53141	51534	100%

Desde la información proporcionada por la tabla 6.3 se realiza el gráfico mostrado en la figura 6.3 con la finalidad de observar la variación estacional del abastecimiento. Se observan mayor cantidad de agua abastecida para los meses de verano, consistente con el aumento de la actividad turística en esos meses.

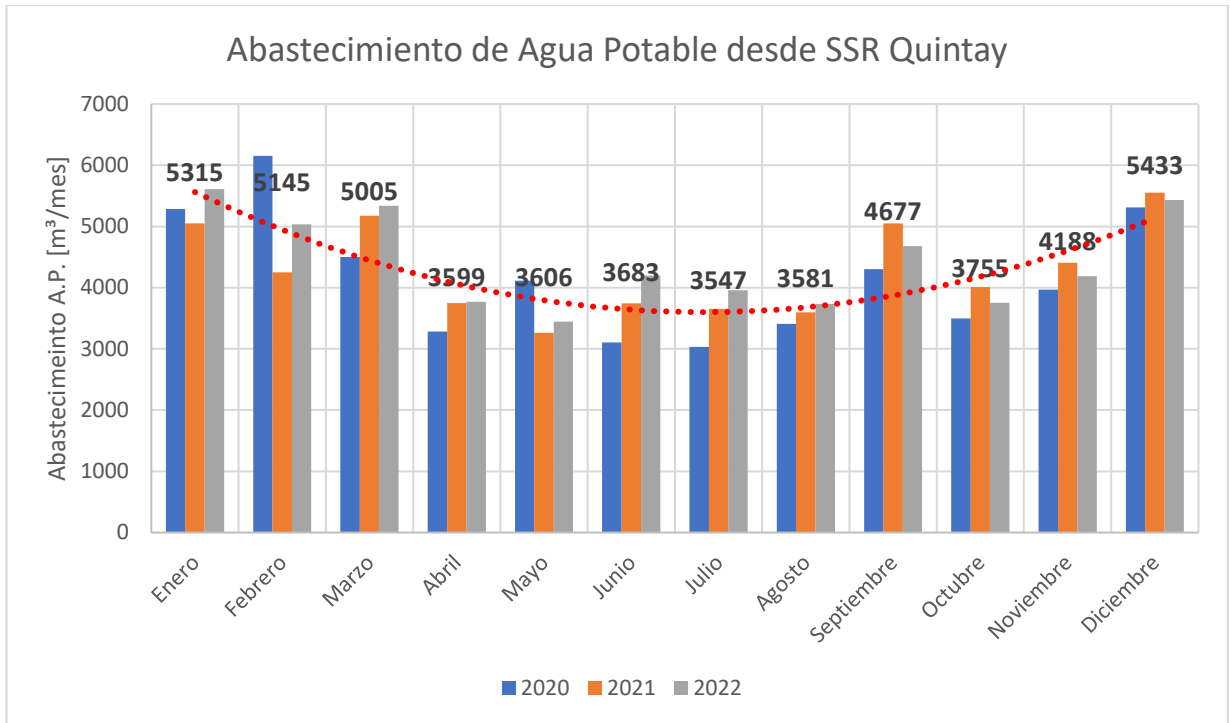


Figura 6.3: Variación mensual Abastecimiento SSR

Cabe destacar que estos volúmenes corresponden a los abastecidos desde SSR Quintay a sus clientes y no consideran las pérdidas que se puedan producir en el sistema, esto se estima de la siguiente forma:

$$X = \left(\frac{V_{extr.} - V_{abast.}}{V_{extr.}} \right) \quad (14)$$

Donde:

X : Pérdidas del sistema (entre 20% y 50%) [42].

$V_{abast.}$: Volumen de agua abastecido por el SSR a los habitantes.

$V_{extr.}$: Volumen de agua extraído por el SSR.

Si se definen las pérdidas del sistema en un 30%, se obtiene:

$$V_{extr.} = \frac{V_{abast.}}{1 - X}$$

$$V_{extr.} = V_{abast.} * 1.43$$

Además, se define la dotación anual como:

$$Dot\ Anual = \frac{V_{extr.}}{N^{\circ}hab.} \quad (15)$$

Obteniendo la dotación anual desde el 2020 a 2022 en metros cúbicos como lo indica la tabla 6.4.

Tabla 6.4: Dotación anual según abastecimiento de SSR Quintay

	2020	2021	2022
Volumen abastecido [m³]	49959	51502	53141
Pérdidas en el sistema [m³]	21482	22146	22851
habitantes	954	965	975
Dotación anual [m³/año]	74.9	76.3	77.9

Si bien la dotación es una variable que depende del tiempo, no se tiene la información suficiente para conocer de qué forma varía, por lo que para efectos del modelo hidrológico se utilizará el promedio anual dado en el decreto 743.

$$DDA_{SSR\ anual} = N^{\circ}hab * 79 \left[\frac{m^3}{hab\ año} \right] \quad (16)$$

Finalmente se obtiene la demanda del SSR Quintay y se compara con los derechos de extracción de aguas actuales en la figura 6.4.

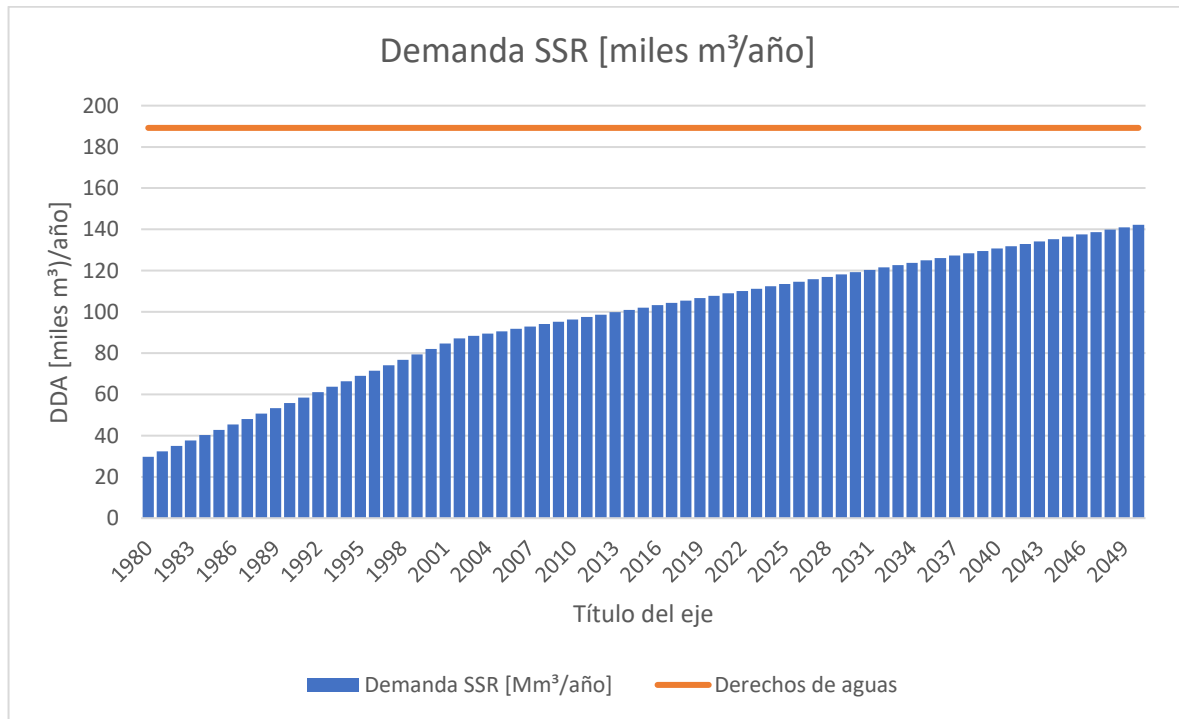


Figura 6.4: Demanda hídrica de SSR Quintay

A partir del gráfico anterior es posible deducir que si la demanda hídrica crece conforme a las estimaciones de aumento poblacional producto de los valores censales y las pérdidas en el sistema se mantienen del orden del 30% cerca del año 2080 es cuando el SSR alcanzará la totalidad de extracción de sus derechos de aguas.

6.2. Demandas de Condominio Santa Augusta

El condominio Santa Augusta es un complejo inmobiliario que cuenta con casas y edificios de gran tamaño, múltiples piscinas, jardines e instalaciones deportivas, entre ellas un amplio campo de golf de 60 [ha] aproximadamente.

Desde Santa Augusta no existe información de los volúmenes utilizados para sus actividades, por lo que las estimaciones se basan en dos usos principales:

- Agua potable de uso humano: Incluye consumo de agua potable, llenado de piscinas, uso para actividades deportivas y uso para restaurantes.
- Riego: Incluye áreas regadas de campo de golf y jardinería.

6.2.1. Agua potable

El volumen de agua utilizado por unidad de tiempo se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$DDA_{AP} = N^{\circ}hab.* \text{Dot} \left[\frac{l}{\text{día} * hab} \right] \quad (17)$$

Desde las imágenes del proyecto Santa Augusta (ver figuras 6.5 y 6.6) se identificaron 2 tipos de viviendas: casas y edificios. Las casas poseen superficies cercanas a los 300 [m²] por lo que pueden albergar a grupos de 10 a 12 personas, en cambio, los edificios cuentan con 5 o más pisos y se estima según inspección visual aproximadamente 6 departamentos por planta que podrían usar grupos de 6 a 8 personas.



Figura 6.5: tipos de viviendas en Santa Augusta [35]



Figura 6.6: Vista en planta de viviendas en Santa Augusta

El nivel de ocupación se calcula a partir de los siguientes supuestos:

- Nivel de ocupación: Se define un nivel de ocupación de 100% para los días festivos, fines de semana y periodo de vacaciones (15 de diciembre a 28 de febrero) y un 20% para los días hábiles restantes, esto podría ser justificado a que según comentarios de funcionarios del condominio Santa Augusta y locatarios de Quintay indican que las dependencias del condominio actúan como segundas viviendas o casas de verano, que son de gente que no reside allí en periodos de días hábiles.
- Cantidad de viviendas: Se contó de forma manual la cantidad de viviendas según las imágenes disponibles de Google Earth en la plataforma QGIS (Ver figura 6.6).

Bajo los supuestos mencionados, se construye la tabla 6.5.

Tabla 6.5: Nivel de ocupación según días en Condominio Santa Augusta

	Total	Capacidad [hab]	Ocupación	
			Ver.-FDS-Fer.	Día hábil
Casas	78	12	100%	20%
Edificios	12	240	100%	20%

Según estas consideraciones el condominio Santa Augusta a capacidad completa cuenta con 1536 personas y en días hábiles fuera de la época de verano solo con 307.

La variación semanal del nivel de ocupación se construyó a partir de los supuestos mencionados y se muestra en la figura 6.7.

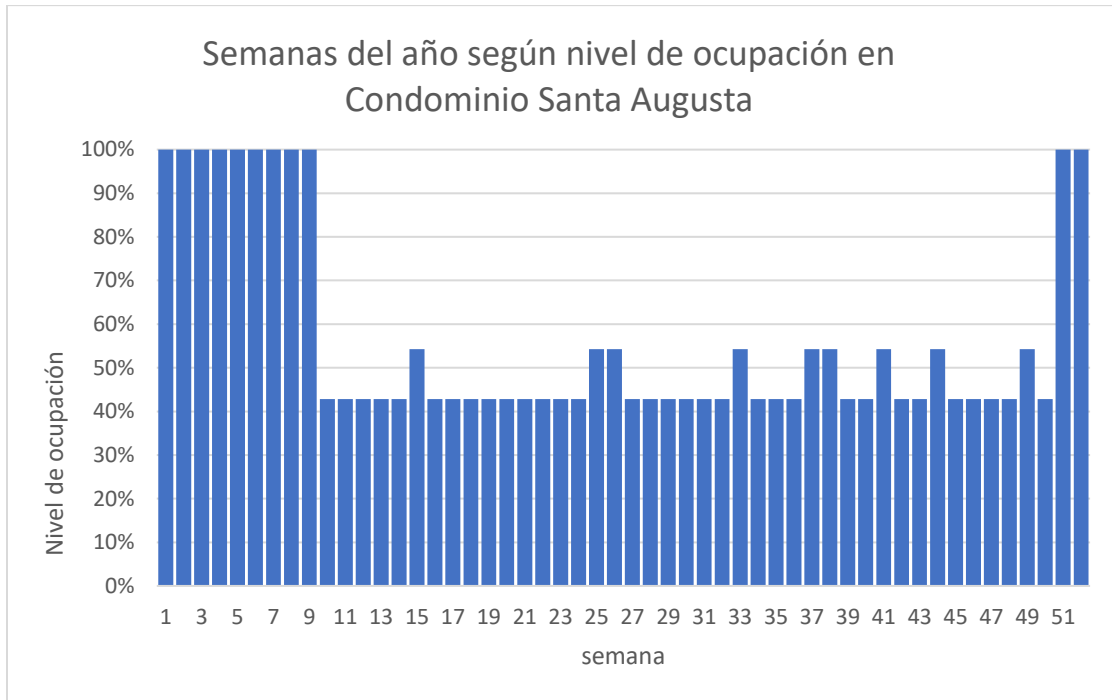


Figura 6.7: Nivel de ocupación semanal en condominio Santa Augusta

La dotación escogida para este cálculo es la del decreto 743 que indica que el requerimiento de agua para turismo en hoteles de lujo es de 800 [l/hab/día] lo cual responde a las necesidades mencionadas en la definición de este apartado. Se obtiene el grafico de demandas semanales mostrado en la figura 6.8.

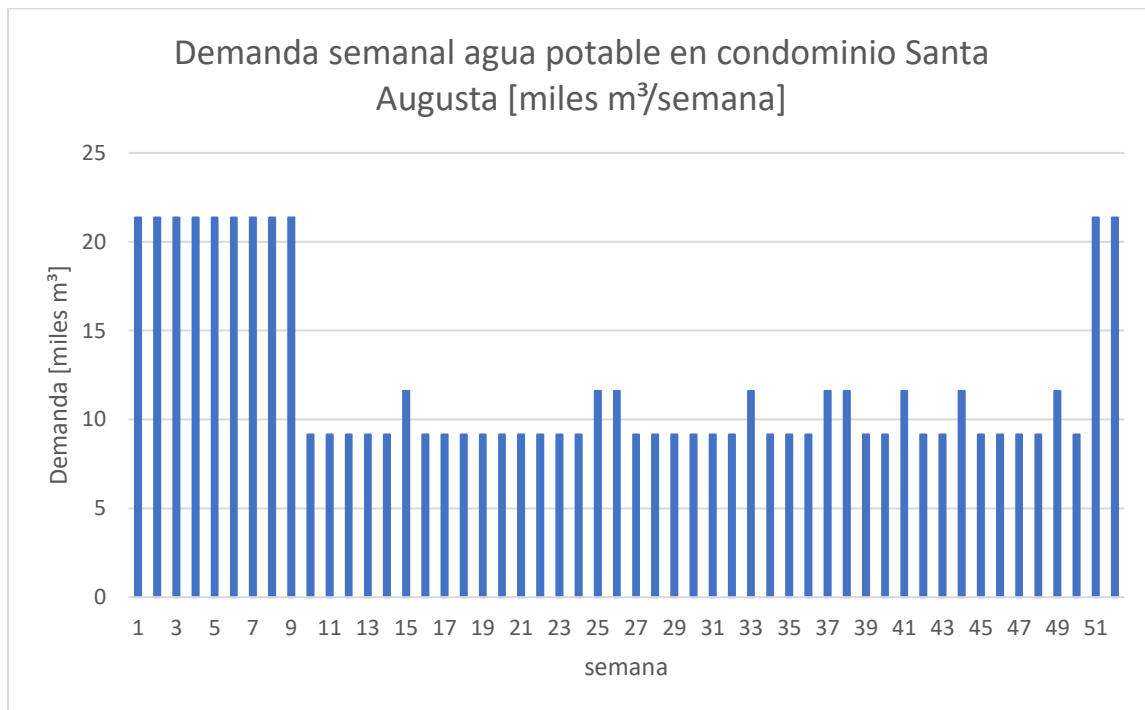


Figura 6.8: Demanda de agua potable semanal en condominio Santa Augusta

La demanda hídrica anual son 632 [miles m³]. Además, se observa que durante el rango temporal para el modelo hidrológico 1980-2020, se han producido urbanizaciones en el condominio (ver figuras 6.9 y 6.10), lo que sugiere un aumento de la demanda hídrica a lo largo del tiempo, debido a que no es posible estimar de manera exacta el aumento de la demanda debido a los proyectos internos del condominio se supone un aumento decadal del 10% con base en lo estimado anteriormente obteniendo así la demanda anual de agua potable por década desde 1980 a 2020 en la figura 6.11.



Figura 6.9: Cambio N°1 producto de urbanización en Santa Augusta



Figura 6.10: Cambio N°2 producto de urbanización en Santa Augusta

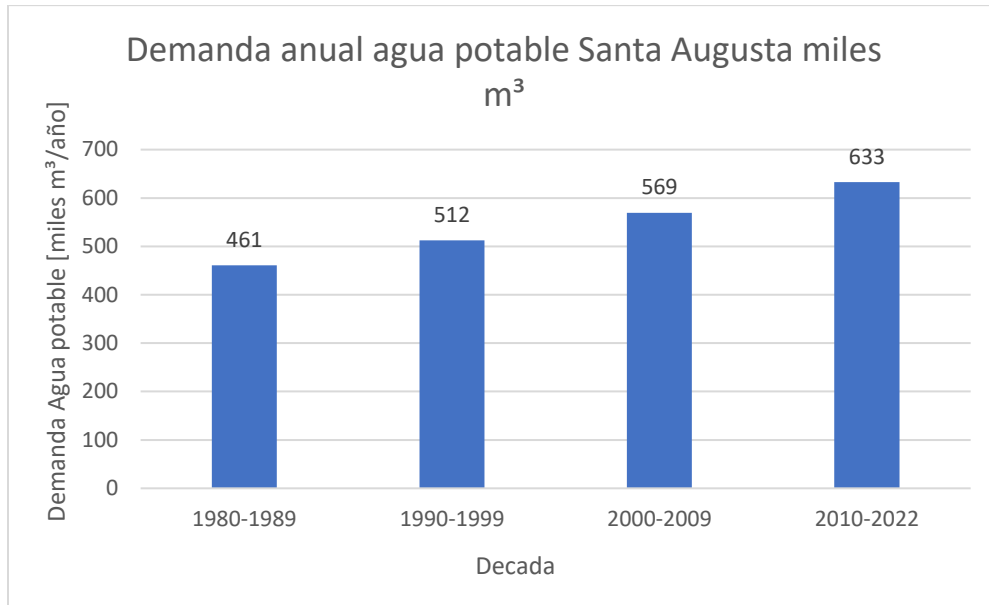


Figura 6.11: Demanda anual promedio en santa augusta por década

6.2.2. Riego

Las demandas de riego dentro del condominio deben ser suficientes para mantener el campo de golf y los jardines en buen estado, desde la plataforma Google Earth Pro se establecen los límites del condominio y las áreas del campo de golf y jardines, se muestran en la figura 6.12.

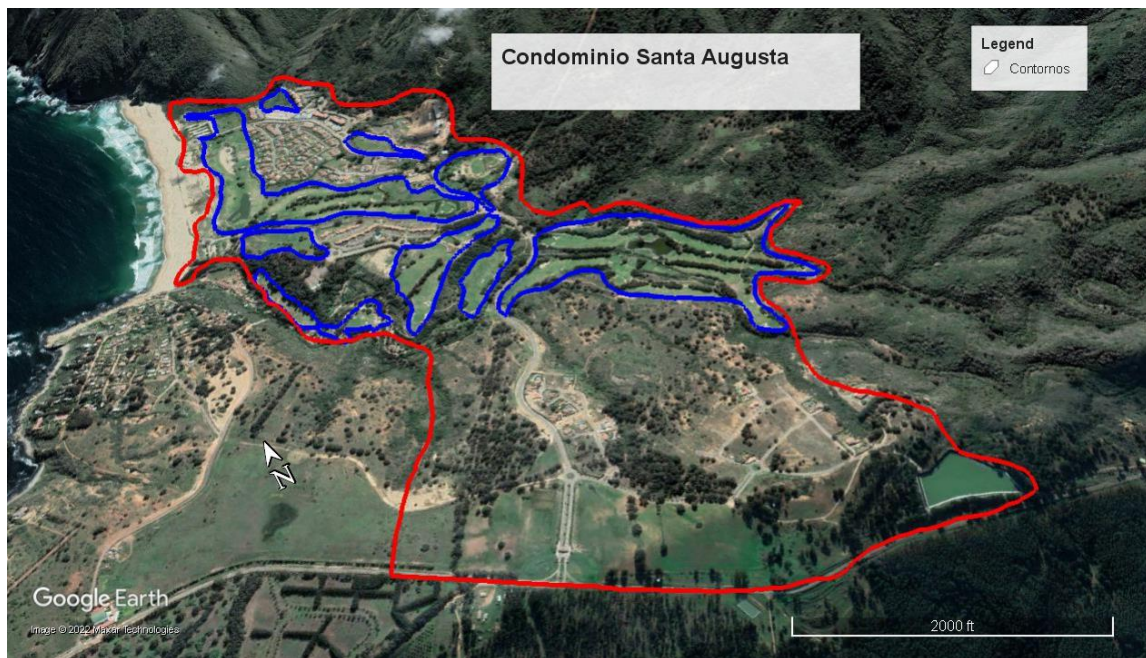


Figura 6.12: Límites de Santa Augusta, en rojo se muestra el límite del terreno y en azul las áreas de riego

En rojo se muestran los límites estimados del terreno del condominio Santa Augusta y en azul las áreas identificadas de riego cuyos valores son 62 [ha] para el campo de golf y 19 [ha] de jardines.

Las fuentes de información [36] indican que la cantidad de agua utilizada para el riego de un campo de golf dependen del diseño y estado del campo, nivel de precipitaciones, temperaturas y otras forzantes climáticas. En territorio español donde el nivel de precipitaciones es mayor que en Quintay (400-700 mm) y con

temperaturas medias similares la media de consumo de un campo de golf estándar de 18 hoyos de 40 a 45 [ha] puede situarse 150.000 y 300.000 [m³/año] [36].

En base a lo anterior se supone un consumo anual de 275 [miles m³/año] para 45 [ha] y se consideran las superficies de jardines como parte del campo de golf, por lo que la demanda anual para las áreas de riego en el condominio son 495 [miles m³/año]. La variación mensual del nivel de riego se supone inversamente proporcional a las precipitaciones en el transcurso del año, los datos se ordenan en la tabla 6.6.

Tabla 6.6 variación mensual de nivel de riego

Mes	Precipitación modelo hidrológico [mm]	% Precipitaciones	Posición llluvias	Posición Riego	% riego promedio	riego promedio [miles m ³]
Enero	0.2	0.03%	12	1	24.21%	120
Febrero	0.8	0.16%	11	2	23.92%	118
Marzo	4.7	0.87%	9	4	17.48%	87
Abril	21.1	3.90%	6	7	3.10%	15
Mayo	95.4	17.60%	3	10	0.46%	2
Junio	131.3	24.21%	1	12	0.03%	0
Julio	129.7	23.92%	2	11	0.16%	1
Agosto	94.8	17.48%	4	9	0.87%	4
Septiembre	39.3	7.26%	5	8	1.01%	5
Octubre	16.8	3.10%	7	6	3.90%	19
Noviembre	5.5	1.01%	8	5	7.26%	36
Diciembre	2.5	0.46%	10	3	17.60%	87
Total	542.2	100%			100%	495

Finalmente se obtienen las demandas de agua para riego de forma semanal y se comparan con las demandas de agua potable y derechos de agua actuales del condominio Santa Augusta en la figura 6.13.

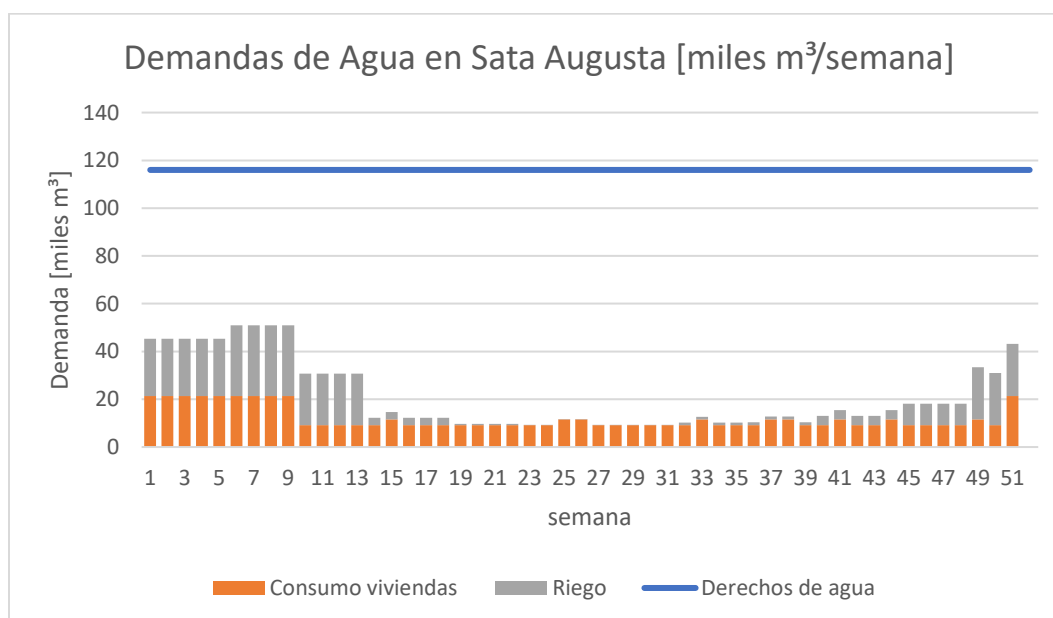


Figura 6.13: Demandas de agua en Santa Augusta

Se observa que el consumo a lo largo del año del condominio Santa Augusta no alcanza la mitad de los derechos de agua que tiene actualmente bajo los supuestos y consideraciones mencionadas.

6.3. Demanda empresa Forestal Valparaíso S.A

La empresa Forestal Valparaíso S.A. concentra el 100% de los derechos de agua superficiales en la cuenca de estudio, sin embargo, las plantaciones forestales en esta región mantienen su crecimiento solo con el agua proveniente de las precipitaciones, sin necesitar otro tipo de riego [37]. Actualmente se desconoce si la empresa cuenta con otra actividad que necesite consumo de agua para su desarrollo, es por ello que se asume que la empresa no está haciendo uso de sus derechos de agua en ninguna fracción.

Sin perjuicio de lo anterior, es importante modelar esta zona en la cuenca debido a que las plantaciones forestales que se encuentran (Pino radiata y eucalipto) tiene parámetros de uso de suelo propio, entre ellos el más importante el coeficiente de cultivo el cual puede variar la demanda evapotranspirativa de la superficie forestal y con ello afectar al ciclo hidrológico de la cuenca.

Desde la página de Conaf se encuentran estadísticas de las superficies forestales a nivel comunal por lo que no es posible conocer con exactitud la magnitud de las áreas en la localidad de Quintay, por lo que se utilizarán la información del modelo PEGH Casablanca correspondiente a la unidad hidrológica “Rio Quintay” la cual posee el área de plantaciones forestales mostrado en la figura 6.14.

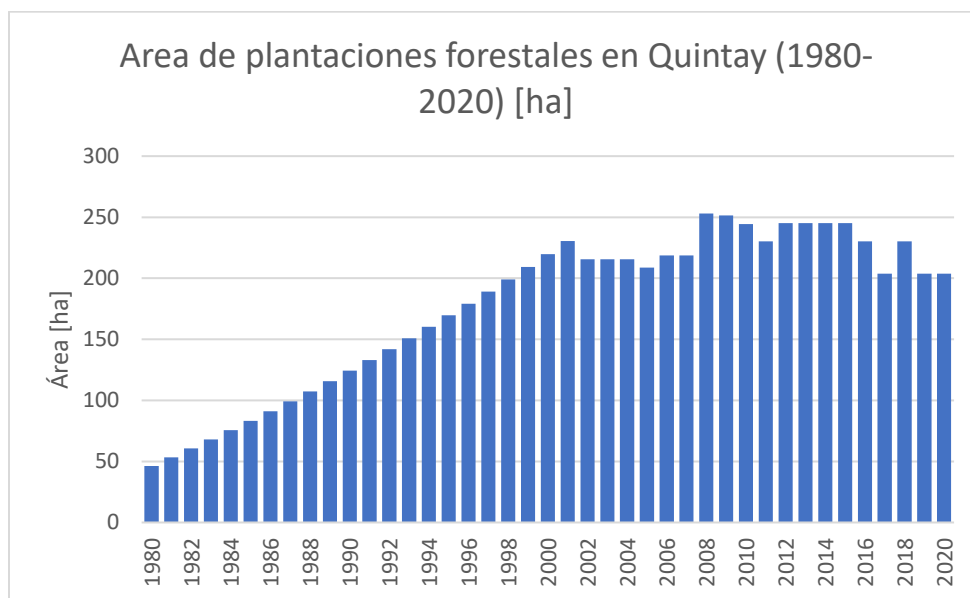


Figura 6.14: Área de plantaciones forestales desde modelo PEGH Casablanca

Las demandas evapotranspirativas de la empresa Forestal Valparaíso S.A se obtendrán según el modelo hidrológico.

6.4. Caudal ecológico

Existen muchas definiciones de caudal ecológico que coinciden en que se trata del caudal necesario dejar en un curso de agua tal que garantice la conservación de los ecosistemas que alberga, mantener la geomorfología, el comportamiento hidráulico y permitir que dicho caudal remanente siga cumpliendo las funciones y servicios fluviales, el concepto ha ido evolucionando ya que se refiere más a un régimen de caudales que a un caudal mínimo [38].

Actualmente existen metodologías para calcular los caudales ecológicos en los ríos de Chile, existen informes y estudios técnicos que calcularon caudales en la región de Valparaíso, pero ninguno lo hizo para la zona de estudio.

Desde el PEGH Casablanca se estimaron los caudales ecológicos mínimos en base a criterios estipulados en el DS N°14 del Ministerio del Medio Ambiente. Obteniendo los valores mostrados en la figura 6.15.

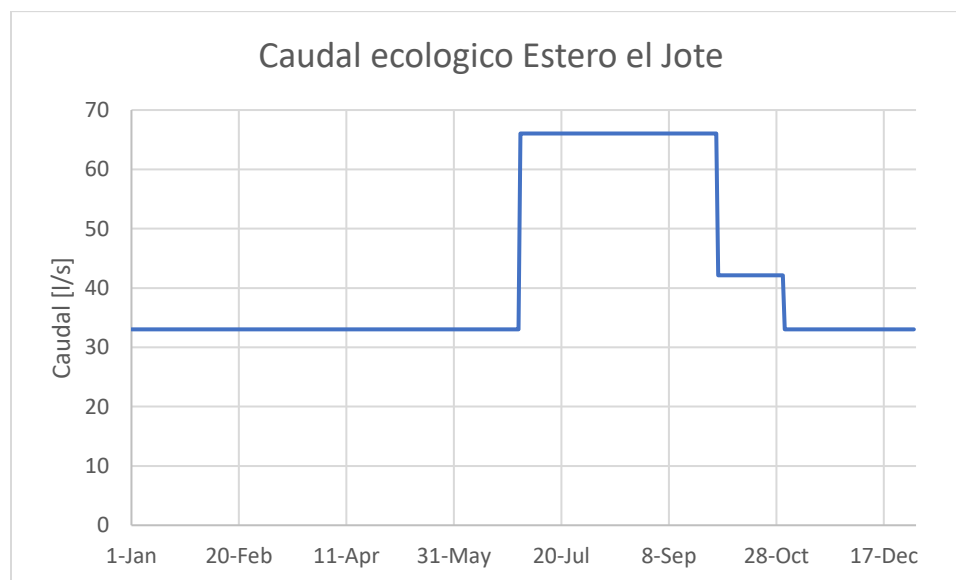


Figura 6.15: Caudal ecológico

El caudal ecológico no presenta variación respecto al rango temporal 1980-2020 por lo que el gráfico es el mismo para todos los años.

6.5. Demandas Evapotranspirativas por producto PML_V2

En el último tiempo se han propuesto métodos indirectos para la estimación de la evapotranspiración real en cuencas usando productos satelitales disponibles. Una de estas metodologías está aplicada en el producto PML_V2 [29], de libre acceso y publicada en la plataforma Google Earth Engine, la cual ha tenido actualizaciones en los últimos años.

El producto PML_V2 es una base de datos que contiene la estimación de evapotranspiración real y de producción primaria bruta en todo el planeta. La evapotranspiración real se encuentra dividida en tres componentes:

- E_c : transpiración de la cubierta vegetal
- E_i : evaporación del suelo
- E_s : agua evaporada interceptada por las hojas

Donde:

$$ET_r = E_c + E_i + E_s \quad (18)$$

El producto tiene una resolución temporal de 8 días, espacial de 500 [m] y con datos desde agosto del 2002 a enero de 2018. Existe potencial de utilización de este producto en la calibración y validación del modelo hidrológico debido a que la evapotranspiración es uno de los parámetros más inciertos y este producto ha sido validado para cubiertas del sur de Chile [39].

En la cuenca estero Casablanca existe una estación que reporta la evapotranspiración en datos que fueron utilizados por el PEGH Casablanca únicamente de carácter comparativo y de validación del producto PML_V2

La gráfica de la figura 6.16 muestra la comparación de los valores de la ETo (Evaporación de referencia) que ha propuesto por la FAO para efectos comparativos entre lugares y en base variables climáticas; reportada en la estación Casablanca y el promedio de los valores reportados por el producto PML_V2 para las mismas fechas. Debido a que PML_V2 es estimado cada 8 días no se tiene una serie continua de este producto. La gráfica muestra que los valores del producto PML_V2 siguen el mismo patrón que los de la estación, con una correlación de 0.7 y un error medio de 0.2 mm/día. Lo anterior sugiere que el producto PML_V2 puede ser utilizado para evaluar la ET en la zona [42].

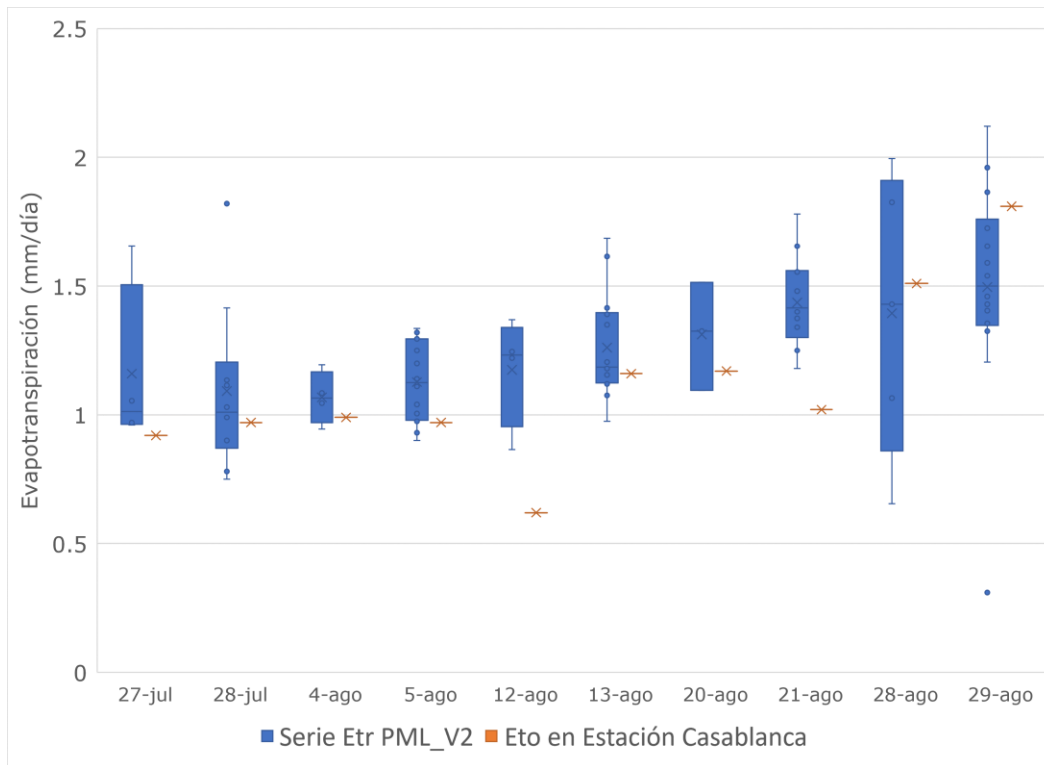


Figura 6.16: Comparación ET entre producto PML_v2 y Estación Casablanca

Para la obtención de los datos de evapotranspiración por el producto PML_V2 se utiliza la plataforma Google Earth Engine en donde se escribe el código asociado al producto y se ingresa el polígono en formato .shp para la cuenca Estero el Jote, es posible observar este proceso en la figura 6.17.

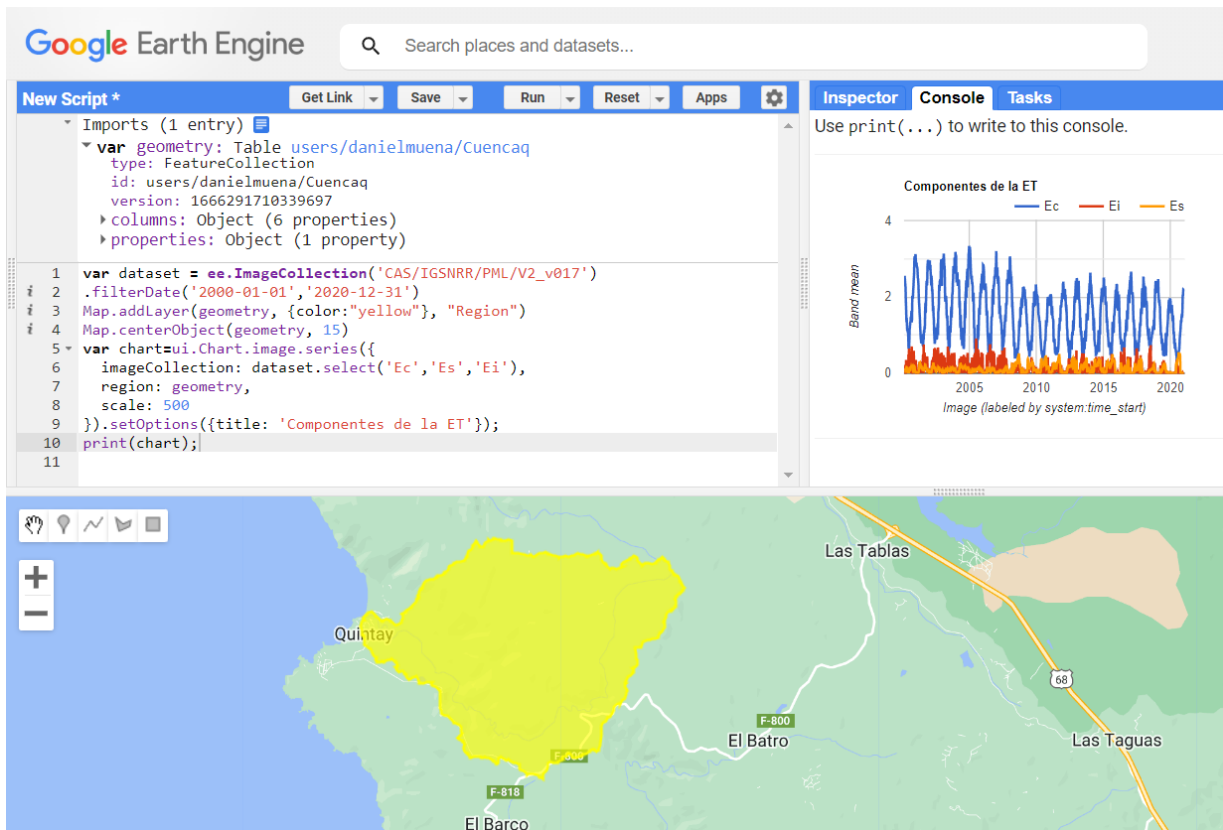


Figura 6.17: Cuenca en Google Earth Engine y obtención de producto PML_V2, Elaboración propia.

Con los datos obtenidos por el producto PML_V2 en GEE se pudo conocer el nivel de evapotranspiración anual desde 2001 a 2018 (ver figura 6.18) y el promedio de los registros durante el año (ver figura 6.19).

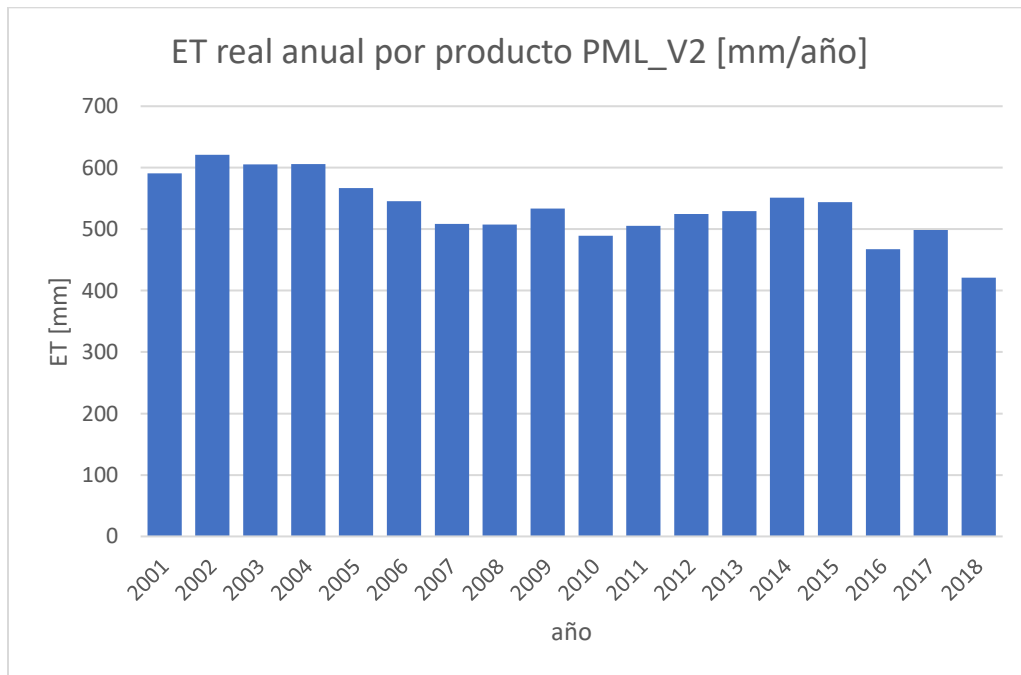


Figura 6.18: ET real anual PML_V2

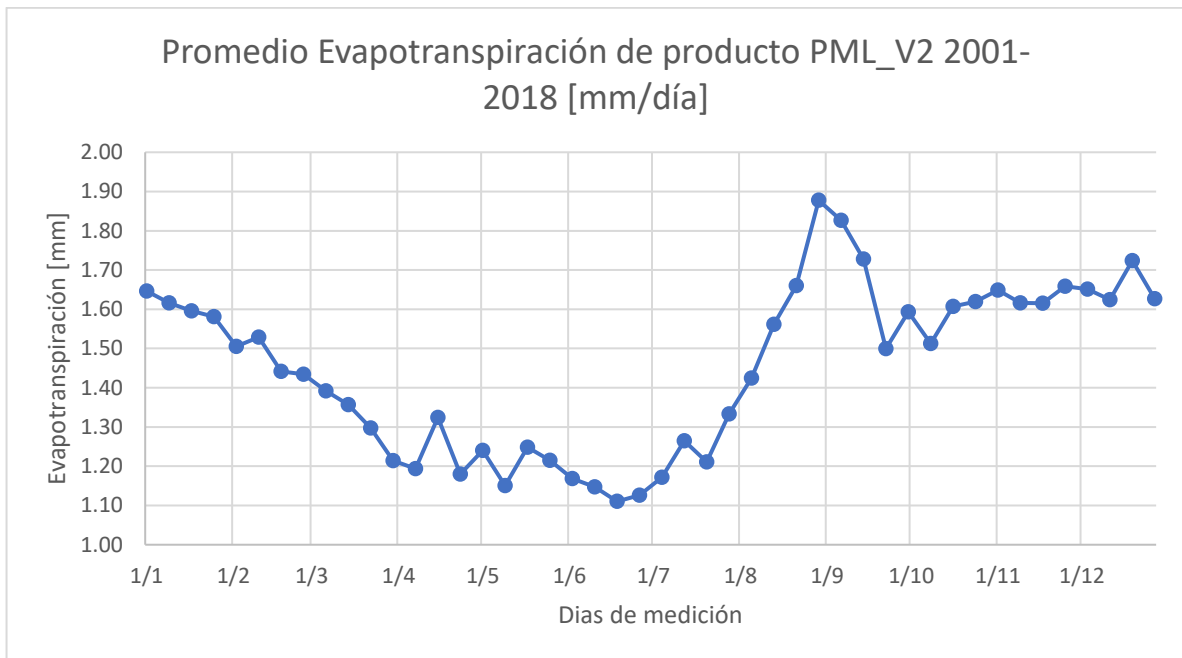


Figura 6.19: ET real promedio por producto PML_V2

CAPÍTULO VII

7. Modelo Hidrológico

El presente capítulo tiene por objetivo describir la elaboración del modelo hidrológico, las series de datos utilizados, los componentes, el método de cálculo, los supuestos considerados y mostrar los resultados de la modelación.

7.1. Elaboración del modelo

Para la cuenca Estero el Jote se elaboró un modelo hidrológico de carácter superficial con un elemento tipo acuífero que simula las entradas, salidas y almacenamiento de las capas sub-superficiales en donde existe concentración de agua subterránea. En la figura 7.1 se aprecia el esquema del modelo.

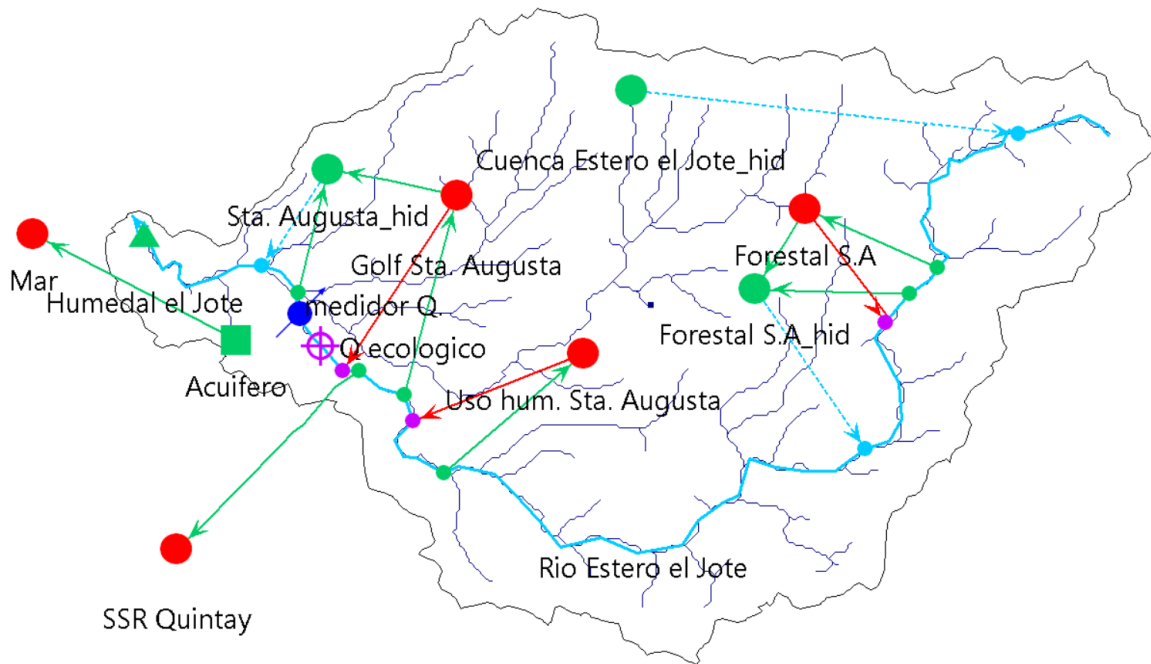










Figura 7.1: Modelo hidrológico para cuenca Estero el Jote

7.1.1. Descripción de elementos

Los elementos “catchments” o “unidades hidrológicas” (círculos verdes) son representaciones de una porción de superficie de la cuenca en donde se desarrolla la hidrología, es decir, posee área, datos climáticos y parámetros de uso de suelo para simular la hidrología natural que dirige el flujo hacia el acuífero y además genera la escorrentía superficial hacia el río principal a través de las flechas en celeste. Los sitios de demanda (círculos rojos) son puntos específicos de extracción de caudal, en este caso se simulan las extracciones del SSR Quintay, Santa Augusta (Riego y uso humano), empresa Forestal Valparaíso S.A. y el caudal desde el humedal el Jote hacia el mar. Las líneas en rojo son flujos de retorno que dirigen el volumen no consumido de agua desde los sitios de demanda devuelta al río o punto de extracción. En la tabla 7.1 se muestra la descripción de cada uno de los elementos incorporados en el modelo hidrológico.

Tabla 7.1: Descripción de elementos del modelo

Elemento	Cantidad	Nombre	Descripción
	5	Forestal S. A	Extracción de agua para empresa Forestal Valparaíso S.A.
		Golf Sta. Augusta	Extracción de agua para riego de campo de golf y jardines en Santa Augusta
		Uso hum. Sta. Augusta	Extracción de agua para consumo humano en Santa Augusta
		SSR Quintay	Extracción de agua para SSR Quintay
		Mar	Demanda marítima ficticia que simula el caudal sobrante del sistema
	3	Cuenca Estero el Jote_hid	Unidad hidrológica que representa el area de la cuenca menos las superficies de la empresa Forestal Valparaíso S.A y Santa Augusta.
		Forestal S.A_hid	Unidad hidrológica que recibe porción no consumida de la extracción “Forestal S.A”
		Sta. Augusta_hid	Unidad hidrológica que recibe porción no consumida de la extracción de “Uso hum. Sta. Augusta” y “Golf Sta. Augusta”
	3	Flujo de Retorno	Elemento de conducción de caudal no consumido
	9	Conducción	Elemento de conducción de drenaje de unidad hidrológica
	3	Escorrentía/Infiltración	Elemento que simula escorrentía ó infiltración en forma de drenaje natural de la cuneca
	1	Medidor Q	Elemento de medición de caudal, usualmente utilizado cuando existen datos de caudal para calibración del modelo

Elemento	Cantidad	Nombre	Descripción
	1	Q ecológico	Elemento de requerimiento de caudal ecológico
	1	Humedal el Jote	Elemento de embalse utilizado para modelación del Humedal el Jote
	1	Acuífero	Elemento Acuífero
	1	Rio Estero el Jote	Rio principal

7.1.2. Método y supuestos considerados

La meta del presente modelo es representar de la mejor manera posible los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca, la calidad de los resultados de los procesos hidrológicos está relacionada con la calidad de los datos de entrada al modelo, en este punto, la falta de información en algunos componentes clave para la validación del modelo lleva a establecer suposiciones con el objetivo de que el modelo hidrológico sea consistente con la realidad observada de la cuenca.

Se utiliza el método de la humedad del suelo para la simulación de la hidrología en las unidades hidrológicas. El modelo tiene un paso de tiempo a nivel semanal, con el objetivo de mantener la resolución temporal del modelo PEGH Casablanca que busca minimizar los errores en la modelación cuando se realizan cálculos respecto al paso de tiempo mensual y lograr mayor representatividad de eventos hidrológicos de mayor intensidad de manera que no sean suavizados tan fuertemente producto de su agregación en pasos de tiempo mensuales.

7.1.2.1. Supuesto Humedal el Jote

Aunque se consiguió información de utilidad para la modelación del humedal el Jote en cuanto a capacidad de almacenamiento y volúmenes observados, se desconoce la interacción que este podría tener con las aguas subterráneas y como medir la evaporación propia del espejo de agua del humedal.

Caracterizar la interacción de flujos entre el humedal y el acuífero requiere de información hidrogeológica que escapa de los alcances de este trabajo, es por ello que el humedal el Jote se modela con un elemento tipo embalse, independiente y separado del acuífero, y que se abastece a partir de una porción del caudal aguas abajo del nodo escorrentía “Sta. Augusta_hid” tal como se muestra en la figura 7.2.



Figura 7.2: Caudal desde nodo a Humedal el Jote

La cantidad de porción de caudal definida anteriormente se obtendrá a partir de un procedimiento iterativo que se basa en probar distintos valores con el objetivo de que el volumen almacenado en el humedal sea consistente con los volúmenes observados.

Por otra parte, debido a que el humedal se considera independiente y separado del acuífero implica que se encuentra siempre saturado con fluctuaciones importantes de volumen almacenado. La curva Elevación-Volumen almacenado que se ingresó al modelo se obtuvo a partir de la línea de tendencia de la figura obtenida según el gráfico 4.31, en donde se supone una elevación máxima de 130 [cm] que se justifica debido a que las estimaciones de elevación a partir de observaciones de imágenes satelitales históricas nunca superaron 1 [m]. La curva modelada en WEAP se muestra en la figura 7.3.

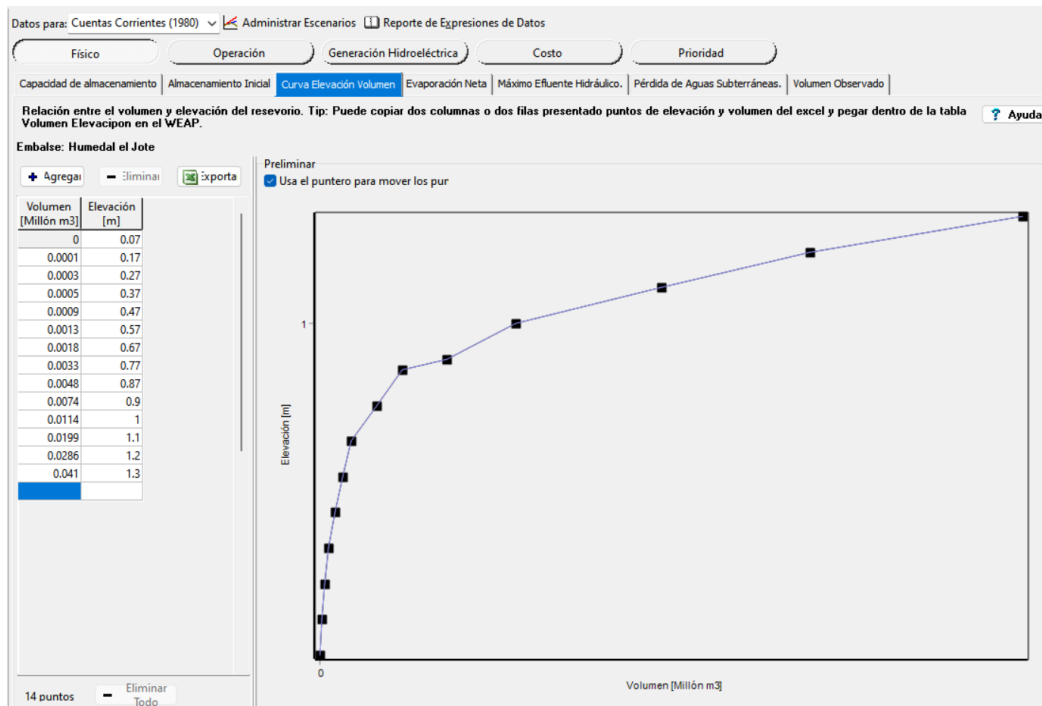


Figura 7.3: Curva elevación-Volumen ingresada al modelo

Un punto importante en la modelación del humedal el Jote es definir la evaporación que sale de éste, debido a que se encuentra siempre saturado, se define la evaporación del humedal como la evapotranspiración potencial de un sitio que no padezca falta de agua.

En el modelo, un sitio que cumple con la definición anterior es la unidad hidrológica “Sta. Augusta_hid” debido a que su superficie corresponde a campo de golf y jardines que son regados constantemente por lo que no padecen falta de agua, luego se ajusta la Evapotranspiración potencial al área correspondiente del humedal de la forma:

$$E_{n\text{ hum.}}[mm] = \frac{ET_{p\text{ Sta. Augusta}_{hid}}[m^3] * 1000}{A_{\text{Sta. Augusta}_{hid}}[m^2]} \quad (19)$$

Donde:

$E_{n\text{ hum.}}$: Evaporación neta del humedal.

$ET_{p\text{ Sta. Augusta}_{hid}}$: Evapotranspiración potencial en unidad hidrológica “Sta. Augusta_hid”.

$A_{\text{Sta. Augusta}_{hid}}$: Área de unidad hidrológica “Sta. Augusta_hid”.

Obteniendo así la serie de datos de evaporación neta mostrada en el modelo WEAP en la figura 7.4.

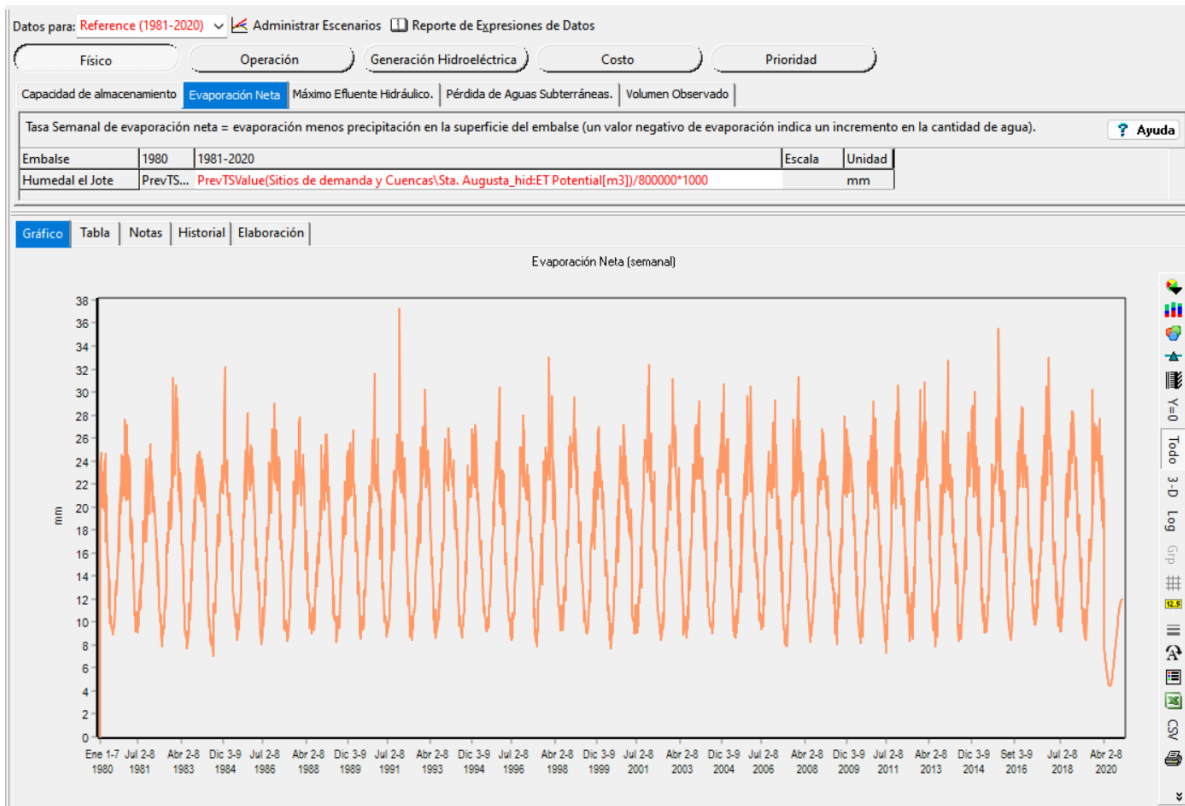


Figura 7.4: Evaporación neta de humedal ingresada al modelo

7.1.2.2. Acuífero

Se define el elemento acuífero como el sitio encargado de concentrar los volúmenes de agua subterránea que llegan a la parte baja de la cuenca, este elemento se encuentra desconectado del humedal sin interacción de flujos.

Este elemento es abastecido por el Estero el Jote aguas abajo del nodo de escorrentía Sta. Augusta_hid que no es recibida por el humedal. Debido a la falta de mediciones del acuífero se desconoce los órdenes de magnitud

del volumen almacenado que este puede contener, sin embargo, a partir de comentarios desde el SSR Quintay, es posible deducir que ha bajado sus niveles en los últimos años.

7.1.2.3. Supuesto sitio de demanda “Mar”

Se creó el nodo ficticio “Mar” con el objetivo de simular el flujo que descarga del acuífero. La descarga del acuífero es necesaria para que el acuífero no esté aumentando sus niveles de almacenamiento por siempre, lo que sería inconsistente con la realidad.

Luego de probar distintos valores de demanda del sitio mar, con el objetivo de buscar consistencias con lo explicado en 7.2.2.2 (Elevaciones de almacenamiento observadas en el humedal) se llegó a un valor de caudal correspondiente al 5% del volumen almacenado por el acuífero, obteniendo la serie de demanda semanal del nodo “mar” que se muestra en el modelo WEAP en la figura 7.5.

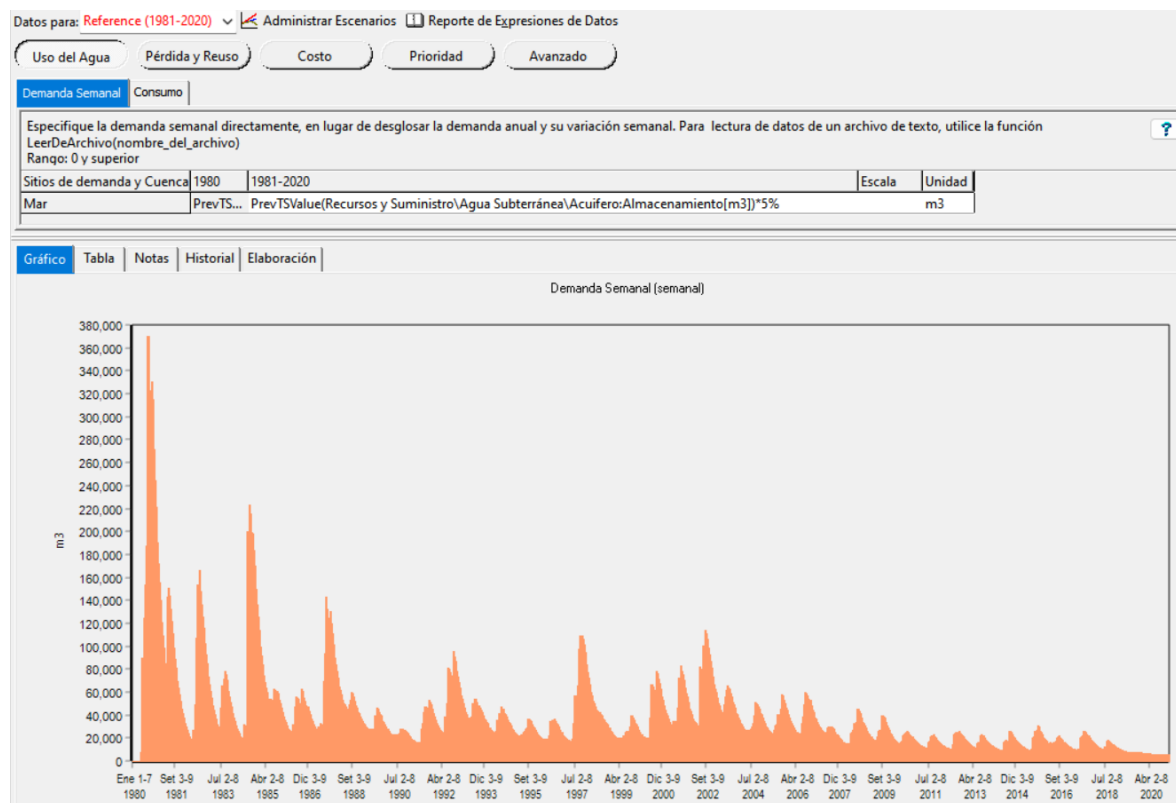


Figura 7.5: Demanda ficticia de sitio “mar” ingresada al modelo

Los resultados de los elementos humedal el Jote, Acuífero y Sito de demanda “mar” se muestra en 7.3.

7.1.2.4. Supuesto Consumos

Los sitios de demanda que consumen agua devuelven una porción importante en términos de aguas servidas, por lo que el consumo se define como el agua que extrae el sitio de demanda menos lo que devuelve, en el caso de los nodos ficticios de extracción, “Golf Sta. Augusta” y “Forestal S.A.” sus aguas son exclusivamente para riego de superficie por lo que el consumo (salida de la cuenca) es cero, por otra parte, se supone un 25% de consumo para “Uso hum. Sta. Augusta” y 100% para “SSR Quintay” debido a que este último descarga sus aguas servidas al mar y no a la cuenca. Los niveles de consumo de cada nodo se muestran en la tabla 7.2.

Tabla 7.2: Consumos de sitios de demanda ingresados en el modelo

Sitio de demanda	Consumo
SSR Quintay	100%
Golf Sta. Augusta	0%
Uso hum. Sta. Augusta	25%
Forestal S.A.	0%

7.1.3. Parámetros de uso de suelo

Con el objetivo de obtener un resultado que pueda complementar los resultados del modelo hidrológico PEGH Casablanca se utilizan los parámetros de suelo considerados en las unidades hidrológicas “Subcuenca_S07” y “Agrícola_S07” para la elaboración de las unidades “Cuenca Estero el Jote_hid” y “Forestal S.A_hid” respectivamente del modelo hidrológico elaborado. Las unidades hidrológicas utilizadas del modelo PEGH Casablanca se muestran en la figura 7.6.

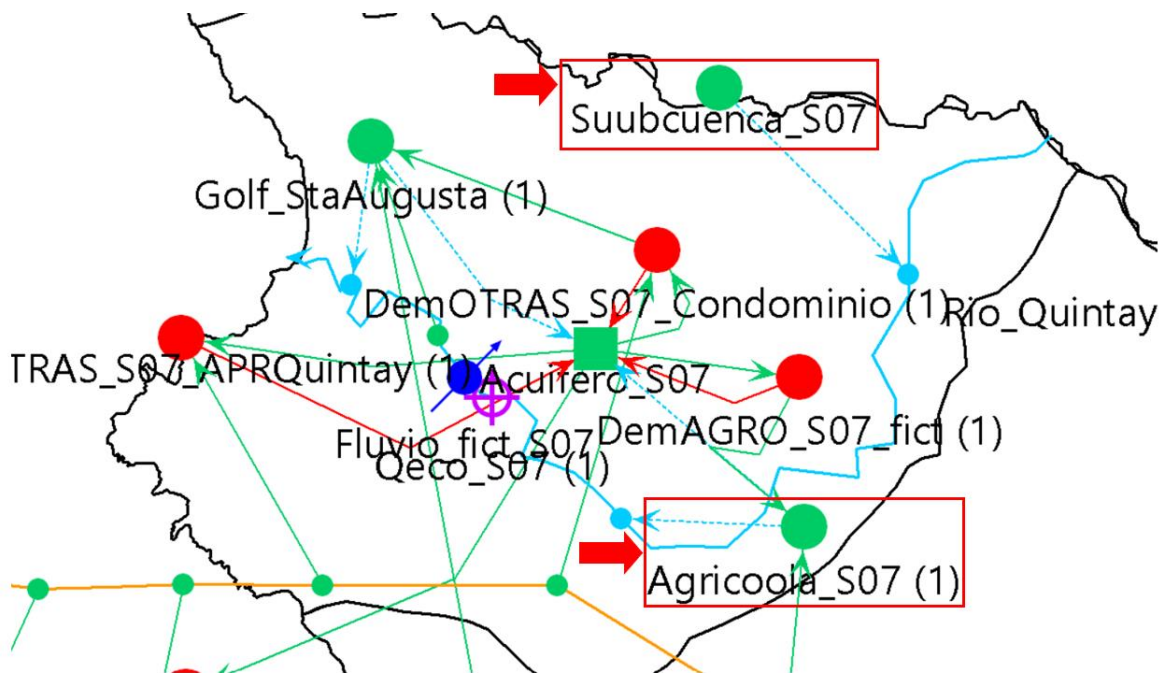


Figura 7.6: Unidades hidrológicas de modelo PEGH Casablanca consideradas en el modelo hidrológico

Para la unidad de riego “Sta Augusta_hid” se utilizaron distintas fuentes de información para definir sus parámetros de suelo debido a que en el modelo PEGH Casablanca no utiliza el método de humedad del suelo para esta unidad hidrológica.

7.1.3.1. Principales Parámetros

En las figuras 7.7 y 7.8 se muestran los principales parámetros de uso de suelo: Área y factor de resistencia a la escorrentía respectivamente.

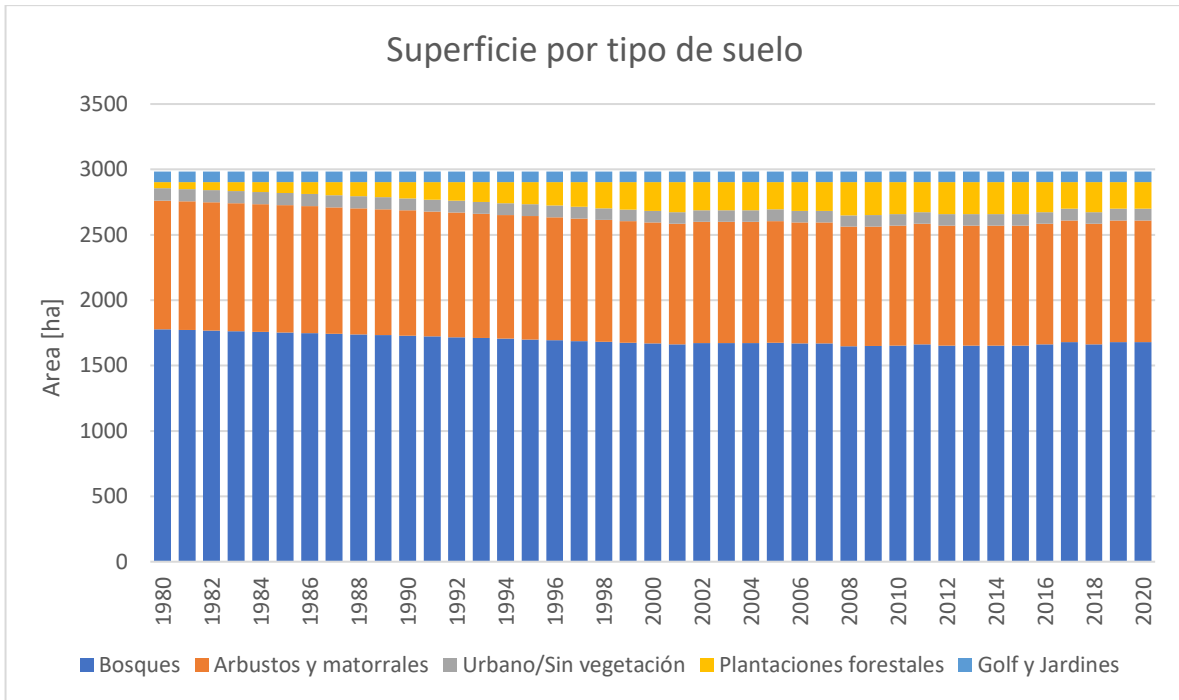


Figura 7.7: Superficie por tipo de suelo en el modelo

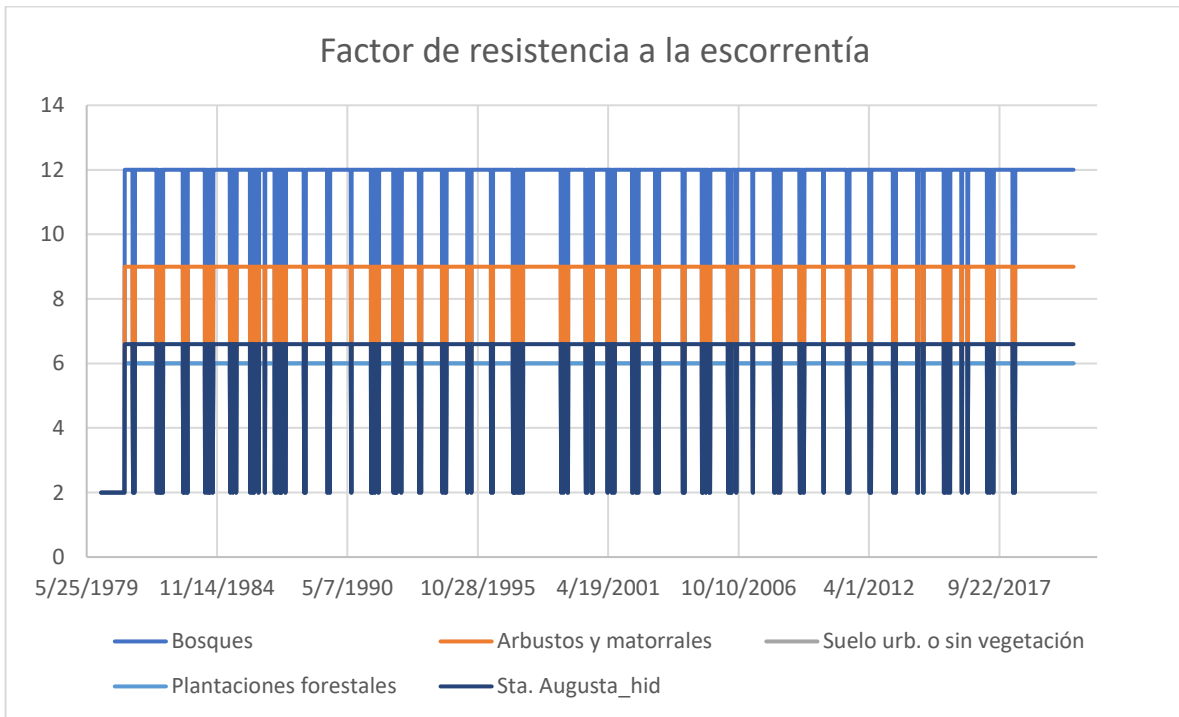


Figura 7.8: Factor de resistencia a la escorrentía

El gráfico de factor de resistencia a la escorrentía construido por el PEGH Casablanca responde a que si las precipitaciones semanales son mayores a 50 [mm] el factor de resistencia a la escorrentía será de 2, caso contrario los valores varían de 6 a 12.

7.1.3.2. Otros parámetros

El resto de los parámetros de uso de suelo se detalla en la tabla 7.3.

Tabla 7.3: Otros parámetros de uso de suelo considerados

	Bosques	Arbustos y matorrales	Urbano o sin vegetación	Plantaciones forestales	Golf y jardines
C.A.S [mm]	4000	4000	2000	2000	2000
C.A.P [mm]	2000	2000	2000	2000	2000
C.Z.R [mm/sem]	24	24	540	540	20
C.P [mm/sem]	10	10	10	50	20
D.P.F	0,07	0,08	0,09	0,15	0,15
Z1[%]	20	20	20	20	30
Z2 [%]	0	0	0	0	0

Donde

- C.A.S [mm]: Capacidad efectiva de retención del agua de la capa superior del suelo (Parte superior del balde)
- C.A.P [mm]: Profundidad de la capa del suelo (Fondo de balde)
- C.Z.R [mm/sem]: Tasa de conductividad hidráulica a saturación plena que será fraccionado de acuerdo a dirección preferida de flujo, entre interflujo y flujo hacia capas inferiores del suelo
- D.P.F: Dirección del flujo preferencial (1=100% flujo horizontal; 0=100% flujo vertical). Usado para la partición del caudal de salida de la capa de la zona de raíces (Balde superior) entre el interflujo y caudal de la capa más baja del suelo (Balde inferior)
- Z1[%]: Valor inicial de almacenamiento de balde 1
- Z2 [%]: Valor inicial de almacenamiento balde 2

7.2. Resultados y validación cualitativa del modelo

7.2.1. Demandas Evapotranspirativas

A continuación, se muestran los resultados de las demandas evapotranspirativas calculadas por el modelo y su comparación con los resultados del producto PML_V2 obtenido en 6.5.

7.2.1.1. Evapotranspiración por unidad hidrológica

Las figuras 7.9 y 7.10 muestran los valores de evapotranspiración obtenidos del modelo para las unidades hidrológicas Cuenca Estero el Jote, Santa Augusta y empresa Forestal S.A en el rango temporal 1980 a 2020 y la variación estacional según el promedio semanal respectivamente.

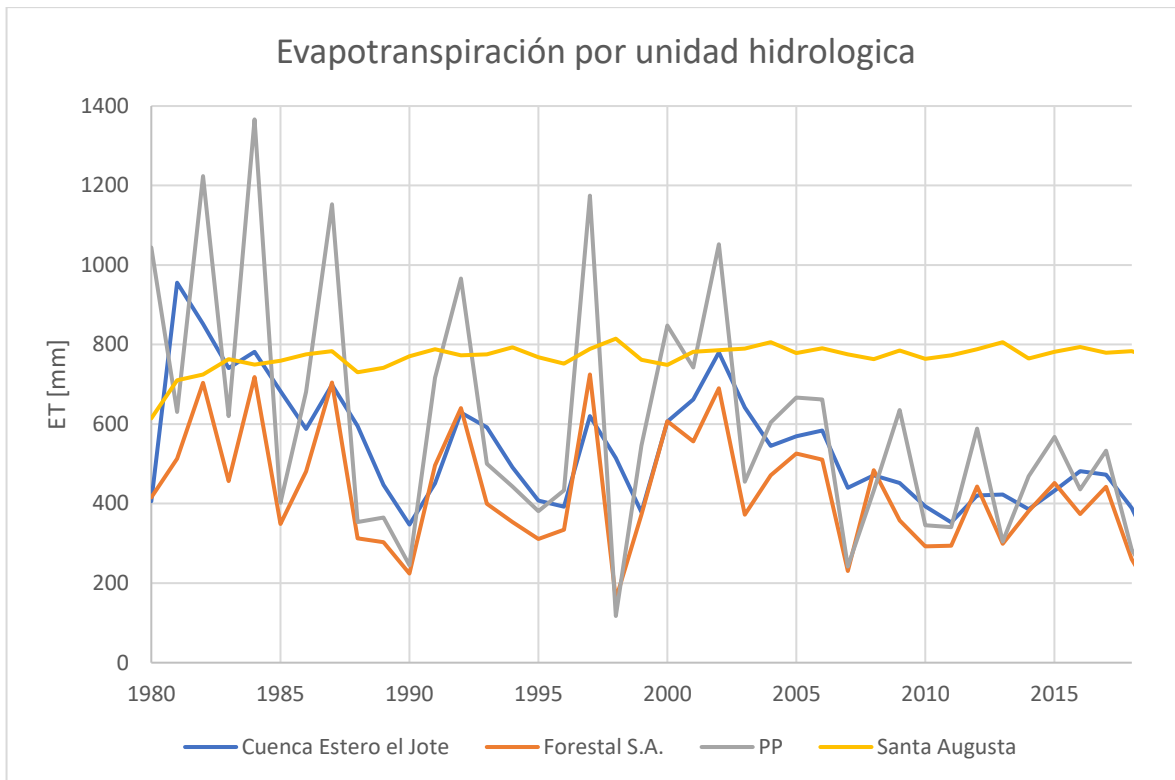


Figura 7.9: Evaporación por unidad hidrológica (1980-2020)

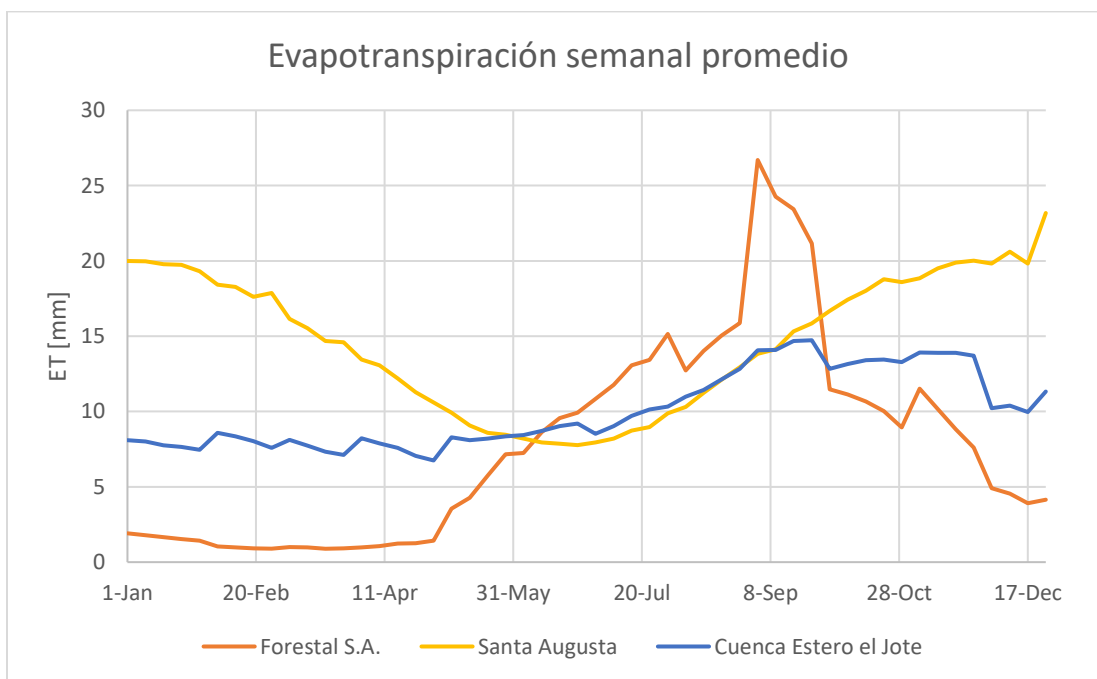


Figura 7.10: Evapotranspiración semanal promedio por unidad hidrológica

Se observa que las mayores demandas evapotranspirativas relativas a la superficie de cada unidad hidrológica son las de Santa Augusta, esto, debido a que la superficie es regada por lo que posee mayor cantidad de agua para ser evaporada hacia la atmósfera.

7.2.1.2. Evapotranspiración total de la cuenca

Las figuras 7.11 y 7.12 muestran la comparación entre la evapotranspiración total de la cuenca completa y los valores obtenidos por el producto PML_V2 a escala anual y semanal promedio respectivamente.

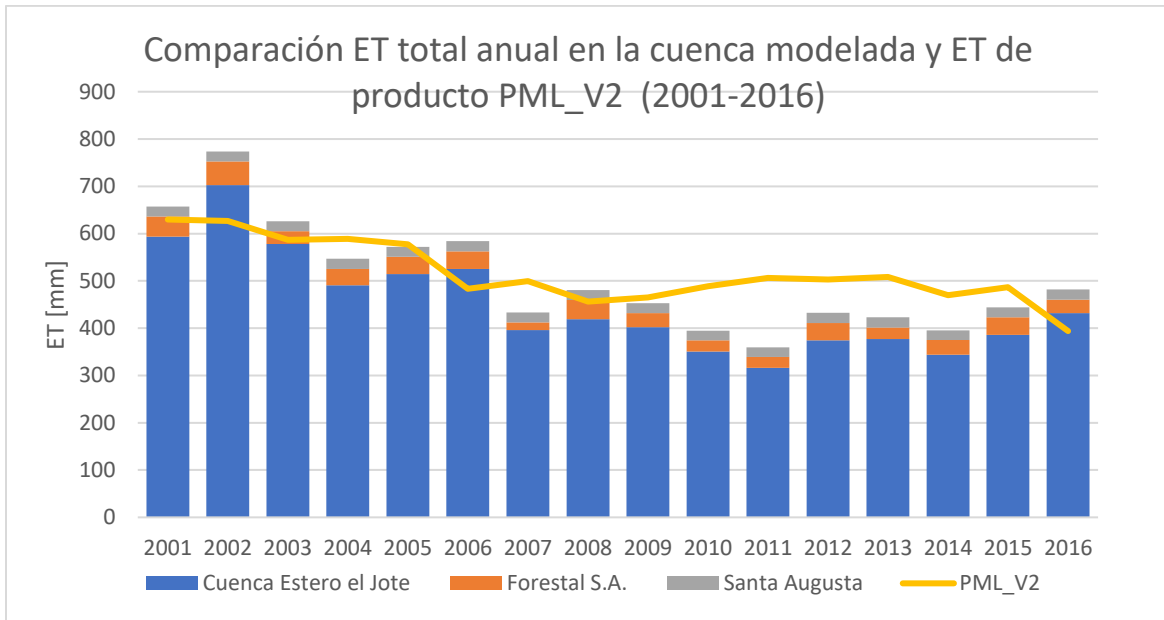


Figura 7.11: Evapotranspiración total en la cuenca modelada vs PML_V2

Se aprecia que los valores modelados son similares a los obtenidos por el producto PMV_V2.

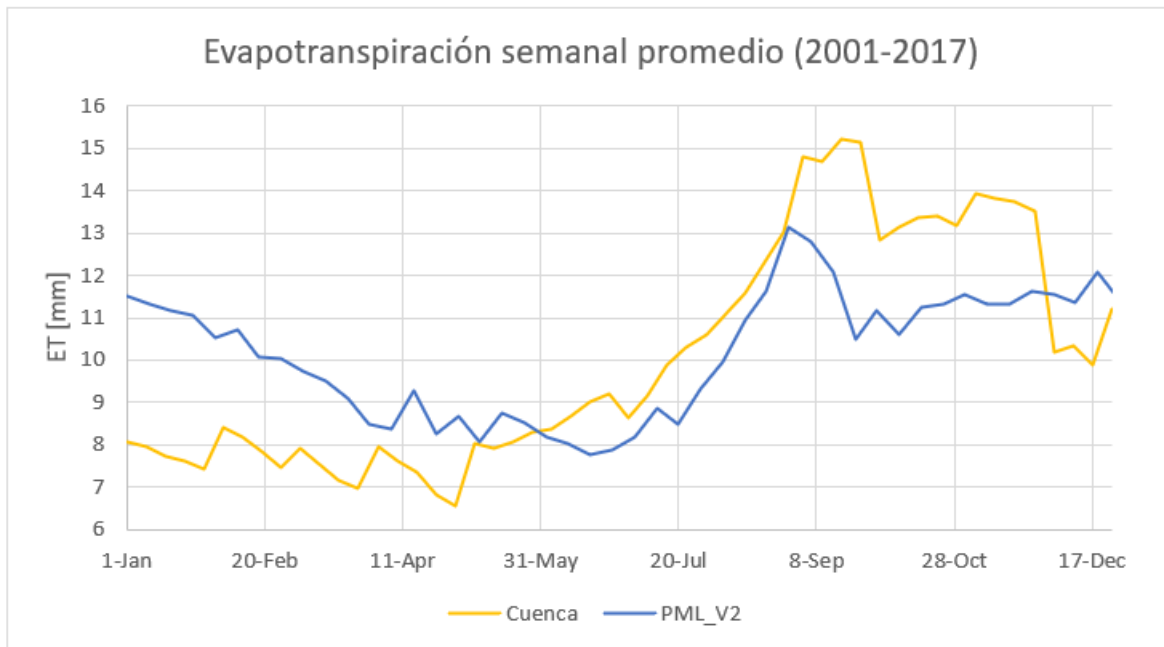


Figura 7.12: Evapotranspiración semanal promedio en la cuenca modelada vs PML_v2

Se observa que los resultados del modelo son cercanos a los del producto PML_V2 en cuanto a magnitud y distribución estacional por lo que las demandas evapotranspirativas son validadas cualitativamente por el producto.

7.2.2. Resultados de Humedal el Jote

Los resultados de la figura 7.13 muestra la comparación entre los volúmenes de almacenamiento modelados en el humedal el Jote con los estimados a partir de las observaciones de las imágenes satelitales, por otra parte, la figura 7.14 muestra la variación promedio a lo largo del año del volumen almacenado en el humedal.

7.2.2.1. Volumen de almacenamiento

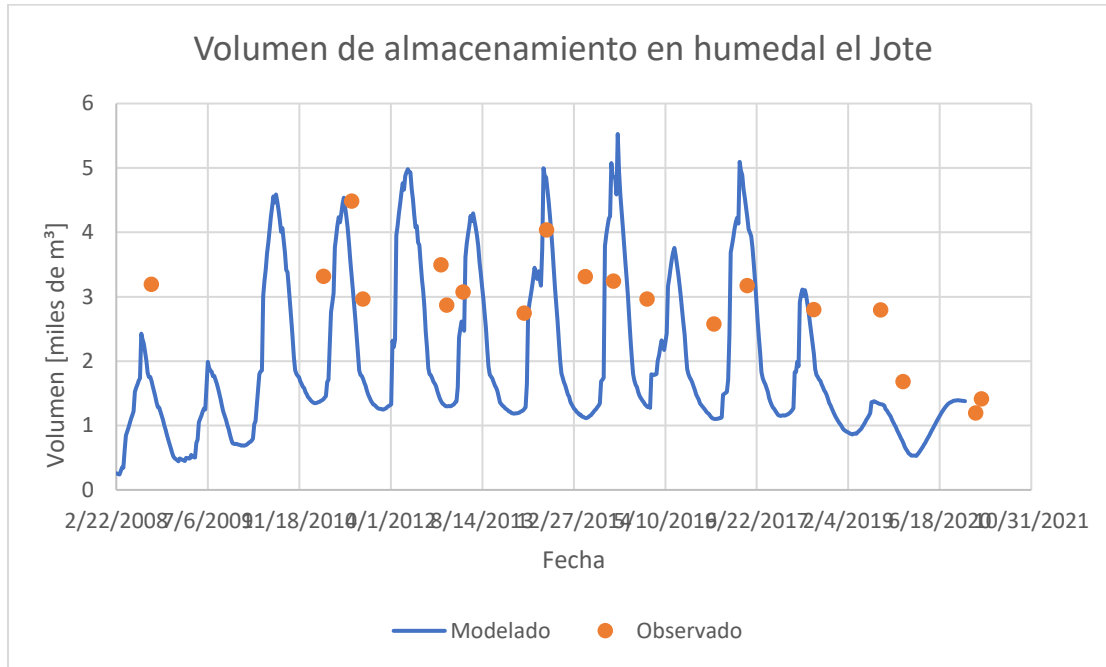


Figura 7.13: Volumen en humedal el Jote (2008-2020)

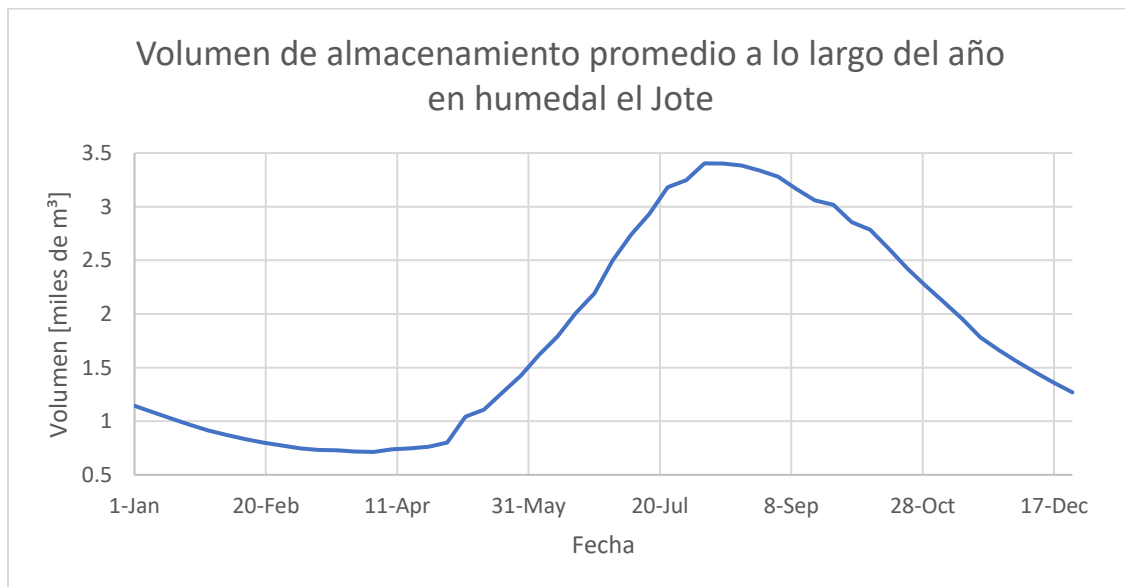


Figura 7.14: Volumen semanal promedio en humedal el Jote

Se observa que ambos resultados son coincidentes en cuanto a ordenes de magnitud, sin embargo, los resultados del modelo presentan una variación a lo largo del año más pronunciada, no obstante, no es posible

descartar la validez de las estimaciones debido a que no se cuenta con las imágenes satelitales suficientes para obtener una serie de datos con un grado de continuidad a lo largo del año que permita observar variación estacional.

7.2.2.2. Elevación de Almacenamiento

Caso similar al anterior, los valores de elevación de almacenamiento cumplen con la misma forma que los valores de volumen de almacenamiento, esto se puede observar en las figuras 7.15 y 7.16.

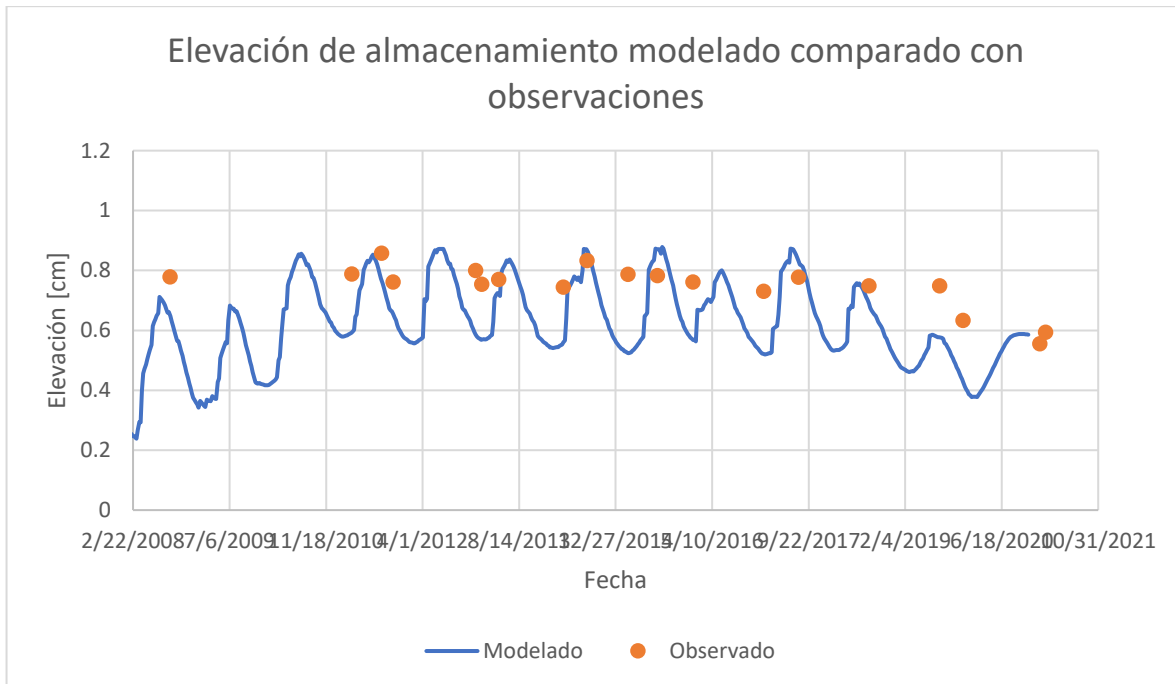


Figura 7.15: Elevación en humedal el Jote (2008-2020)

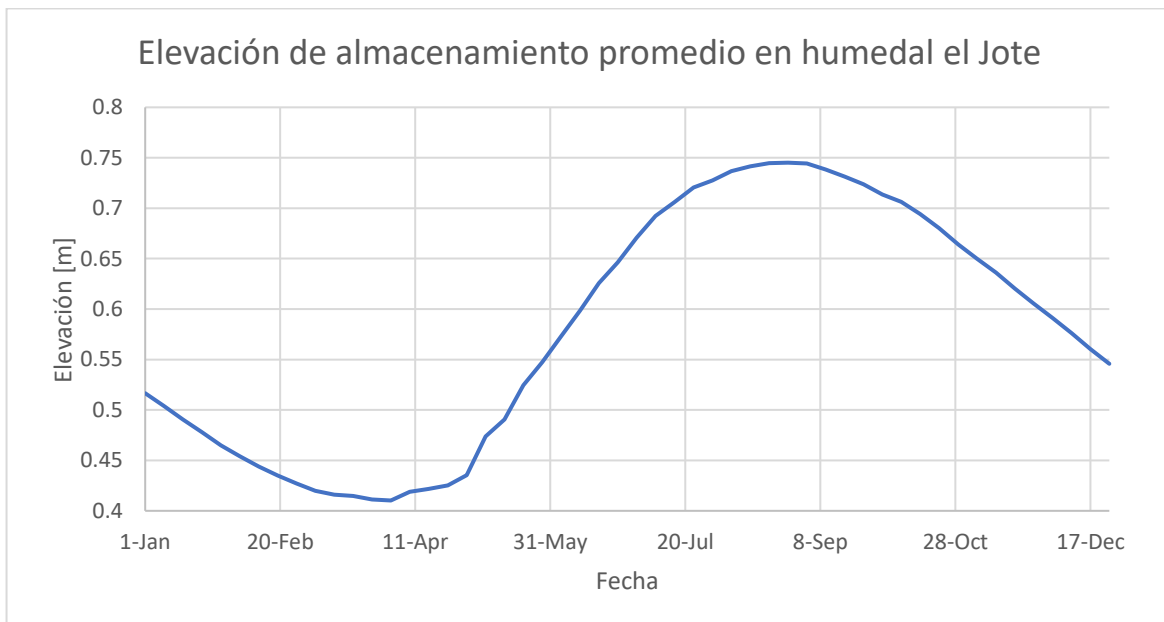


Figura 7.16: Elevación semanal promedio en humedal el Jote

La porción de caudal que llega desde aguas abajo del nodo escorrentía Sta. Augusta_hid es del 1%, este valor es suficiente para resultar en las fluctuaciones de volumen y con ello de elevación que se muestran en los gráficos, se observa que, con dicha porción de caudal, los valores de almacenamiento que entrega el modelo son muy cercanos a las estimaciones realizadas por imágenes satelitales bajo los supuestos considerados. El otro 99% del caudal aguas debajo del nodo escorrentía Sta. Augusta_hid será enviado hacia el elemento acuífero, la explicación anterior se puede observar gráficamente en la figura 7.17.



Figura 7.17: Caudal desde nodo a Acuífero y a Humedal el Jote

7.2.2.3. Caudales Afluentes y Efluentes

Las figuras 7.18 y 7.19 muestran los caudales entrantes y salientes del humedal el Jote como cantidad total por año y luego la variación semanal promedio a lo largo del año respectivamente.

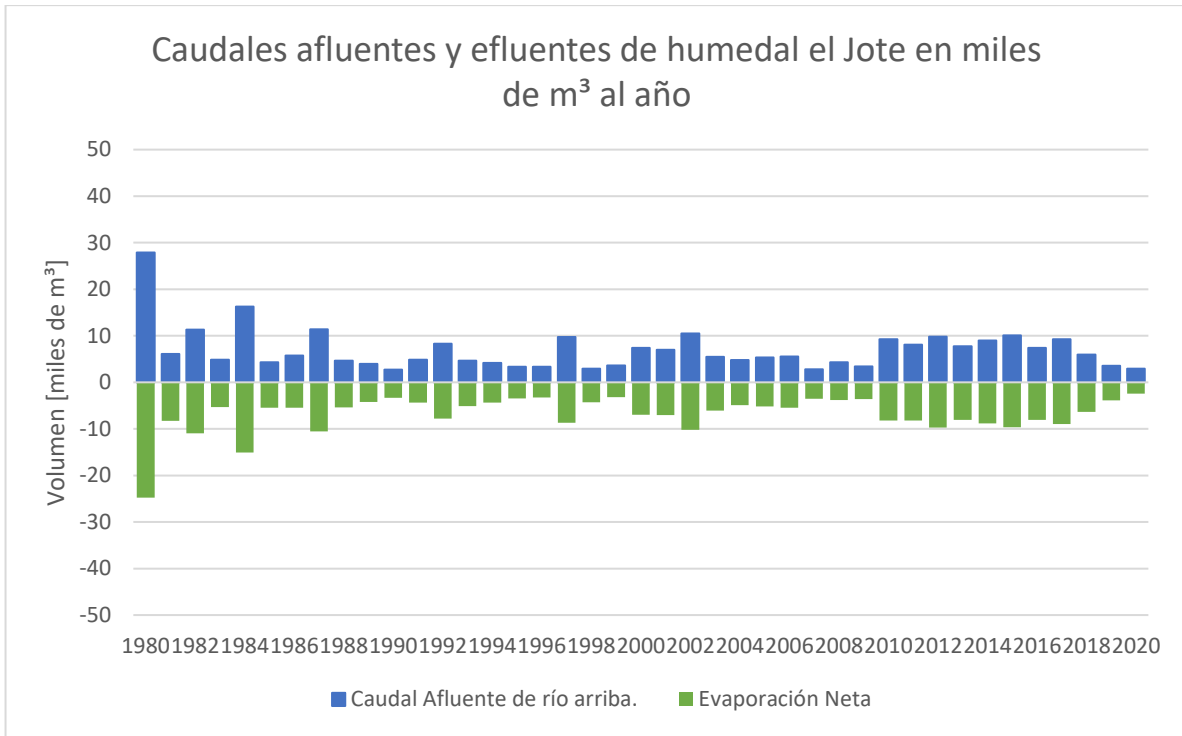


Figura 7.18: Caudales afluentes y efluentes a humedal el Jote

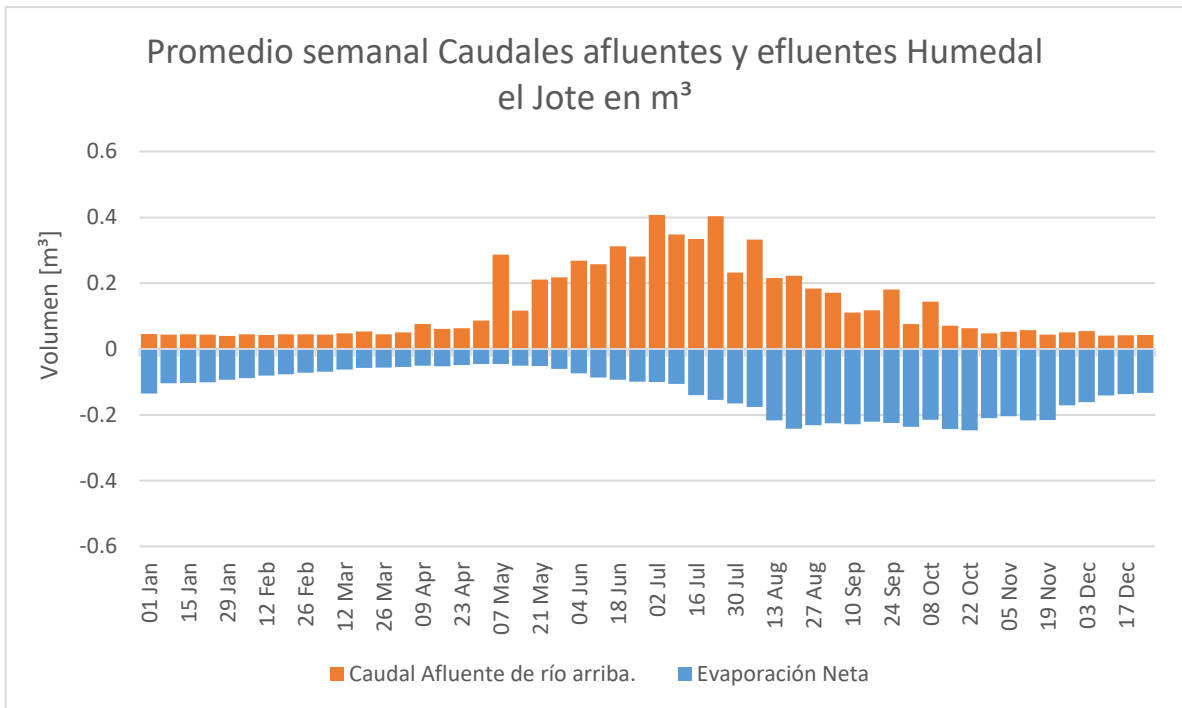


Figura 7.19: Promedio semanal caudales afluentes y efluentes a humedal el Jote

Tal como se modeló, el humedal no presenta caudales efluentes, su almacenamiento está dado únicamente por la porción de caudal que llega desde el nodo aguas debajo de escorrentía santa Augusta, la evaporación que sale del humedal es suficiente para resultar en fluctuaciones entre los 30 y 85 [cm] de elevación de

almacenamiento, lo que estarían representando resultados cercanos a las estimaciones en base a a observaciones de imágenes satelitales.

7.2.2.4. Evaporación de Humedal el Jote

Las figuras 7.20 y 7.21 muestran el volumen evaporado desde el humedal el Jote hacia la atmosfera a nivel anual y semanal promedio respectivamente.

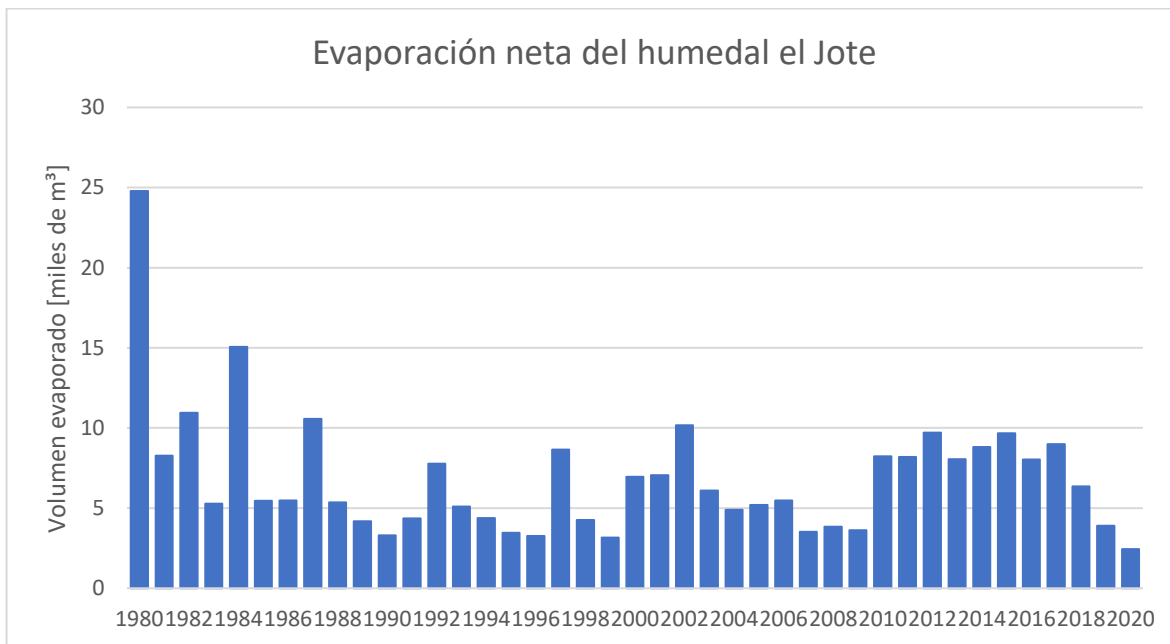


Figura 7.20: Evaporación neta humedal el Jote

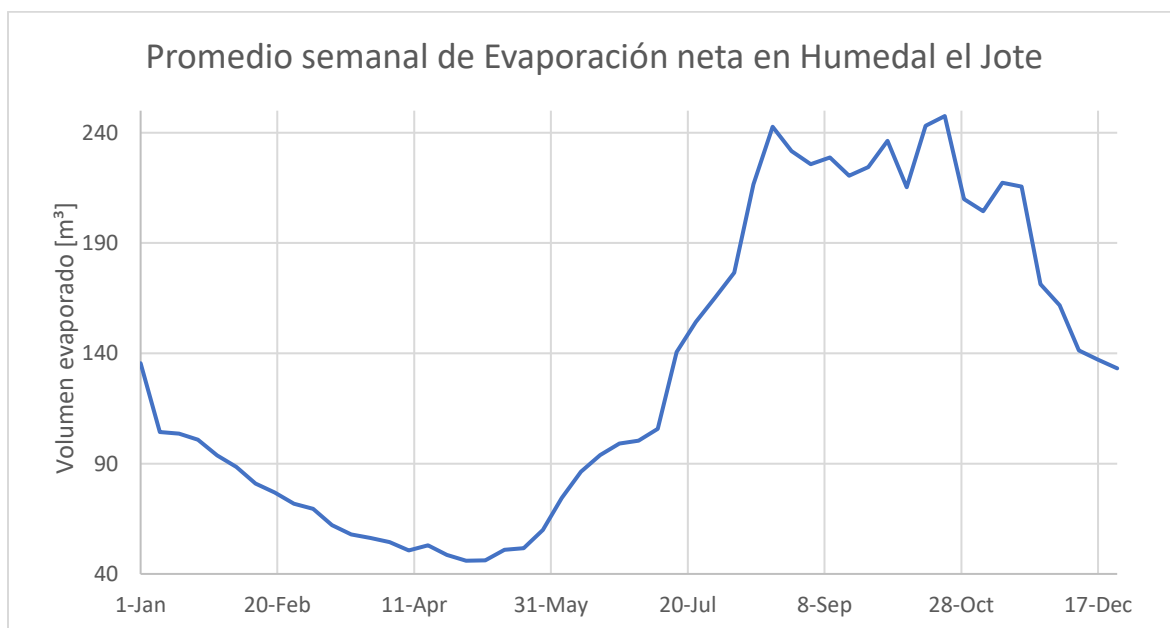


Figura 7.21: Evaporación neta promedio semanal de humedal el Jote

Bajo los supuestos considerados, la evaporación del humedal modelada como la evapotranspiración potencial de una porción de suelo saturada de santa augusta con el área superficial del humedal resulta en valores coherentes con la realidad.

7.2.3. Caudales en medidor

Las figuras 7.22 y 7.23 muestran los caudales en el elemento medidor y su comparación con los caudales VIC obtenidos a partir de los resultados del Balance Hídrico Nacional (BHN). Se muestra el caudal a nivel anual y luego el semanal promedio del rango temporal considerado respectivamente.

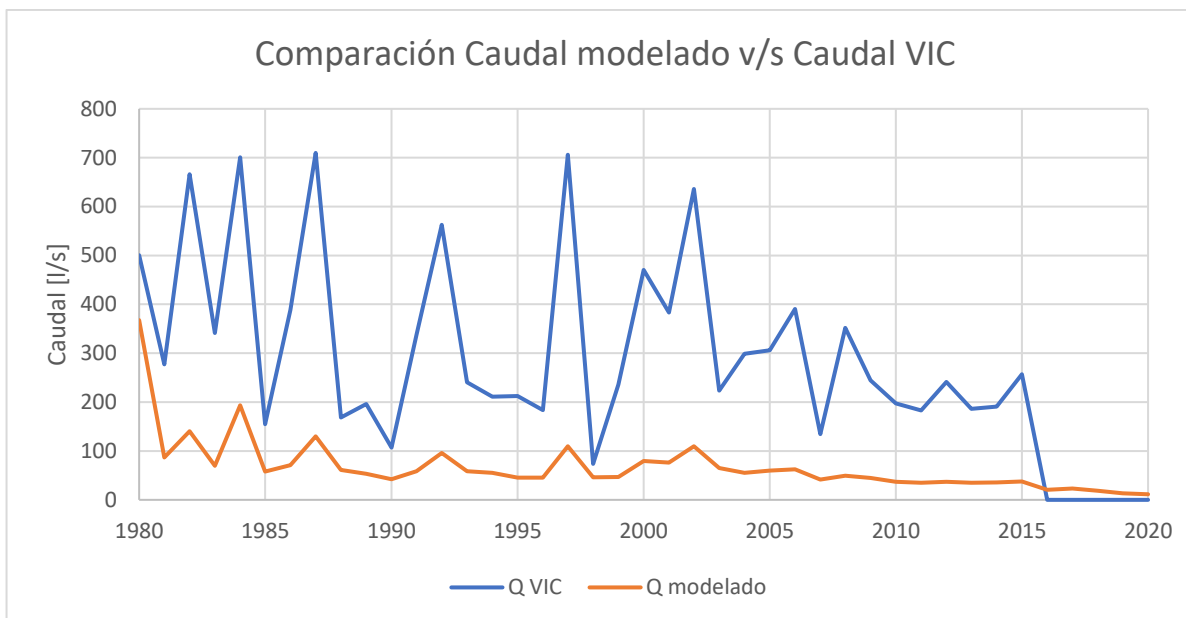


Figura 7.22: Comparación anual entre caudal modelado y caudal VIC

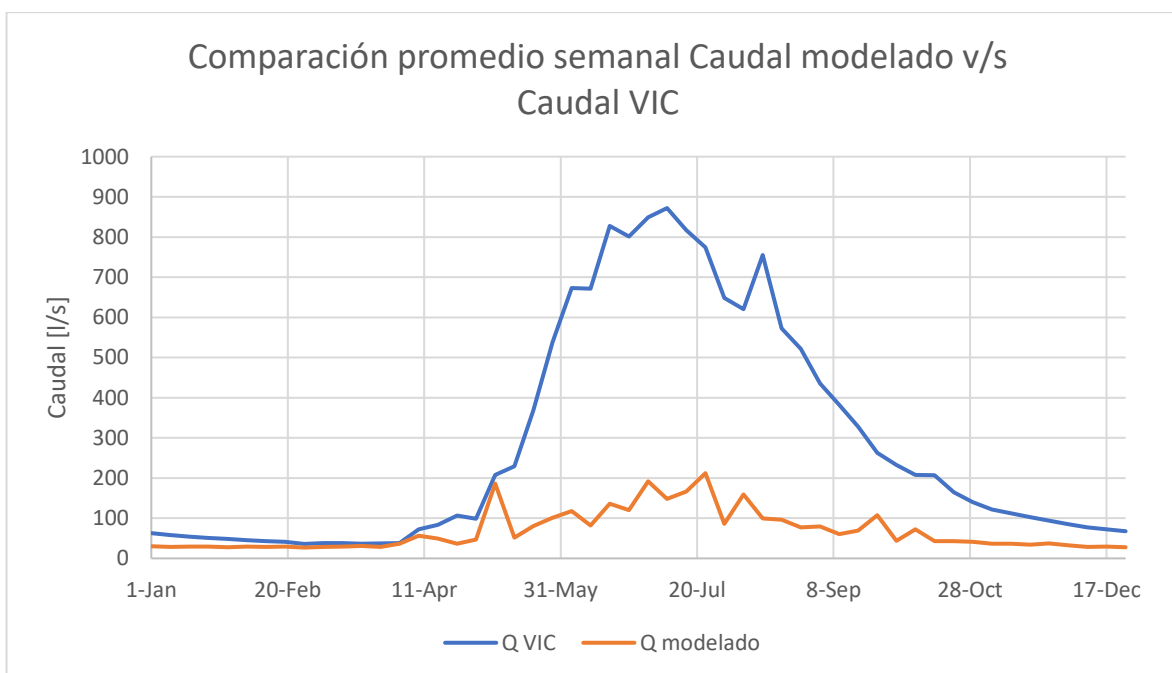


Figura 7.23: Comparación semanal promedio entre caudal modelado y caudal VIC

Al igual que los resultados del modelo PEGH Casablanca se observa que la comparación de los resultados de ambos modelos muestra que el modelo VIC representa bien la estacionalidad de los caudales, pero con un orden de magnitud superior a los valores obtenidos en la modelación en este estudio.

Para que exista los caudales que indica el modelo VIC se debería poder observar un flujo superficial constante en la cuenca, lo que hoy en día no está ocurriendo.

7.2.4. Resultados de acuífero

El acuífero es recargado desde aguas abajo del nodo de escorrentía Sta. Augusta_hid y se definió una salida hacia el mar de 5% respecto del volumen de almacenamiento del acuífero, lo que permitió que en la modelación este no esté siempre aumentando su volumen almacenado y sea capaz de mostrar fluctuaciones con el paso de los años y variabilidad estacional. En laa figura 7.24 se muestra el nivel de almacenamiento con resolución semanal para el rango temporal 1980-2019.

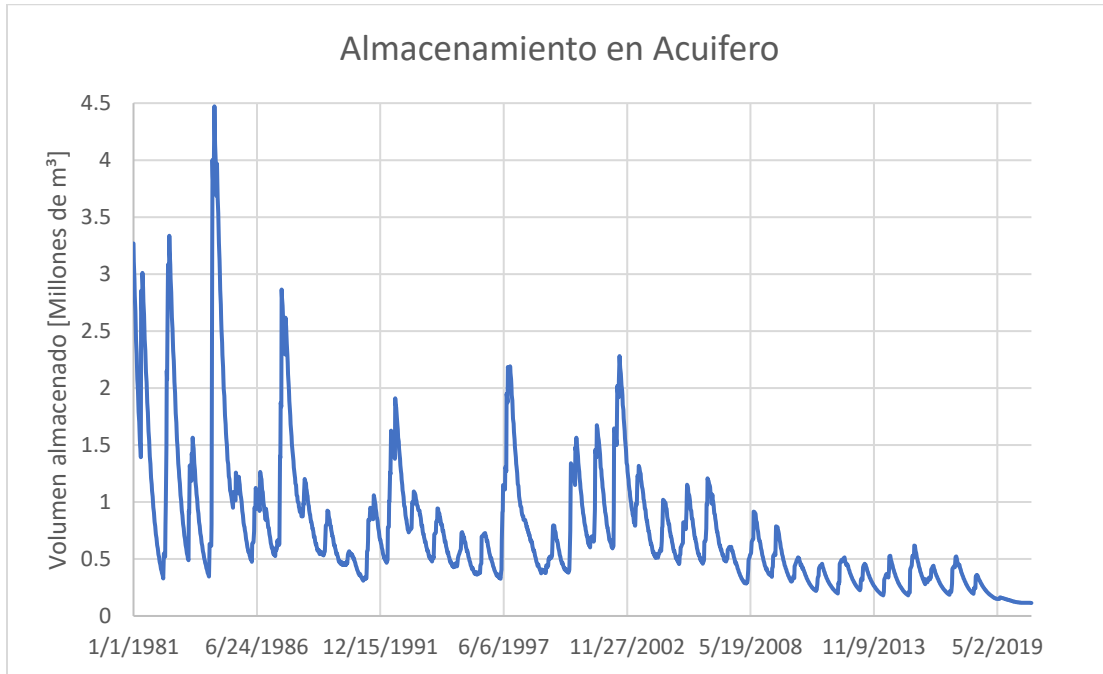


Figura 7.24 Nivel de almacenamiento en acuífero 1980-2020

El almacenamiento a lo largo de los años tiene una forma consistente con lo que podría ocurrir en cuanto a almacenamientos peaks luego de los meses de lluvias y un nivel de almacenamiento que ha decaído con el paso de los años, teniendo los niveles más bajos en los últimos 5 años, sin embargo, existe falta de herramientas para poder calibrar estos resultados y tener un orden de magnitud de referencia. La figura 7.25 muestra el promedio semanal de almacenamiento.

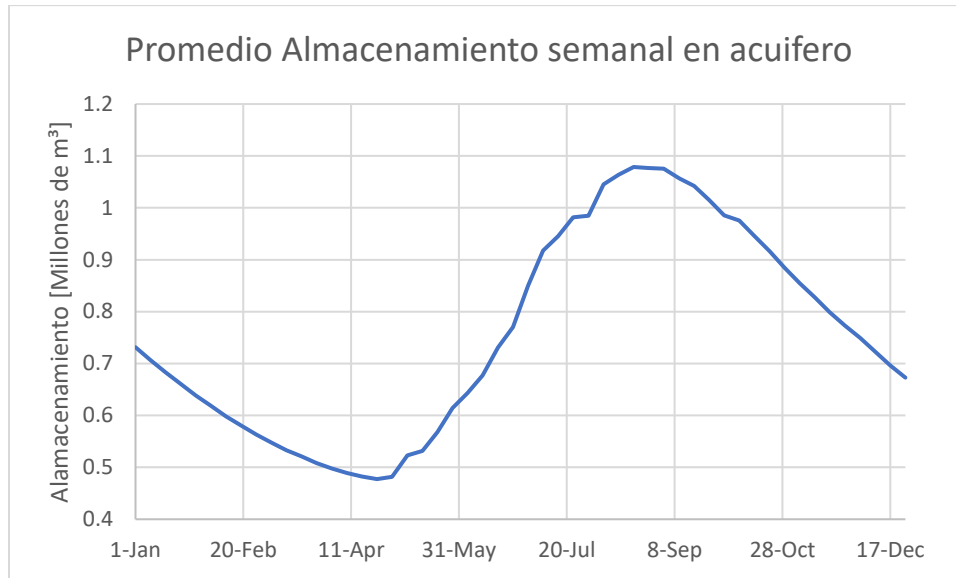


Figura 7.25: Nivel promedio semanal de almacenamiento en acuífero

El promedio semanal a lo largo del año muestra valores consistentes con los periodos de precipitaciones, existe una baja del nivel de almacenamiento hasta el mes de abril, luego se recarga el acuífero producto de las lluvias, y este vuelve a descender los últimos meses del año. La figura 7.26 muestra el caudal afluente hacía el nodo de demanda “mar” desde el acuífero.



Figura 7.26: Caudal afluente hacía sitio “mar” 1980-2019

Con el 5% de demanda del mar respecto del volumen almacenado por el acuífero es posible conseguir resultados entre 20 [l/s] a 40 [l/s] desde el 2010 en adelante.

7.2.5. Balance Hídrico

Los resultados de balance hídrico en la cuenca se presentan a nivel anual y semanal promedio en las figuras 7.27 y 7.28 respectivamente.

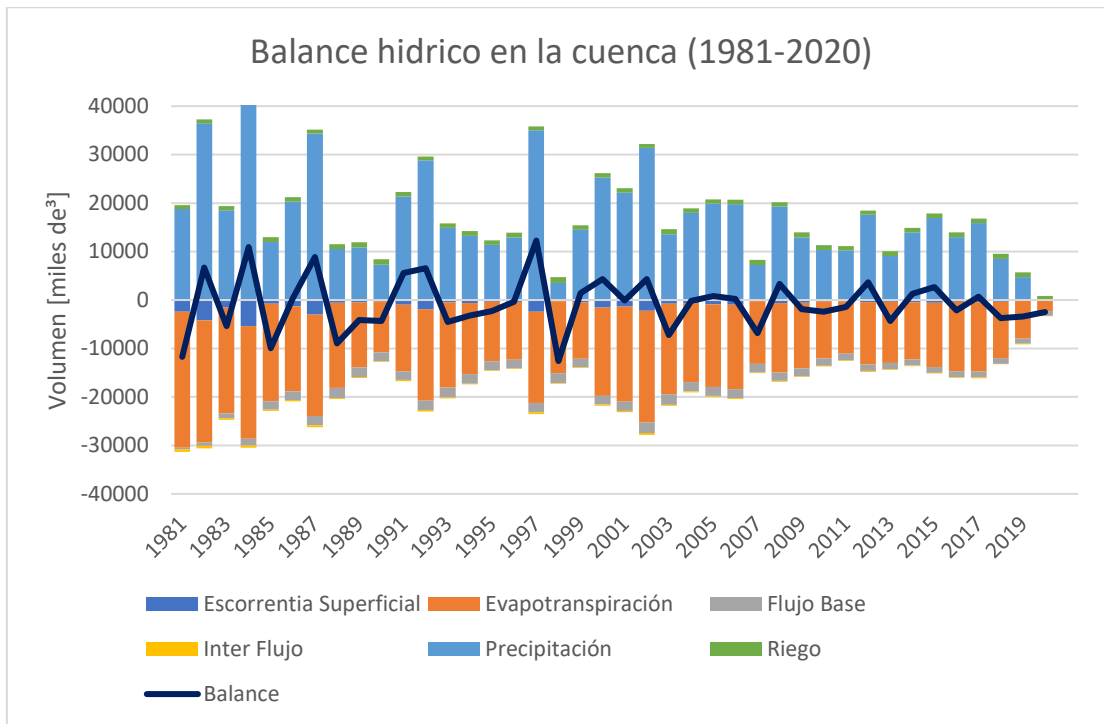


Figura 7.27: Balance hídrico anual en la cuenca

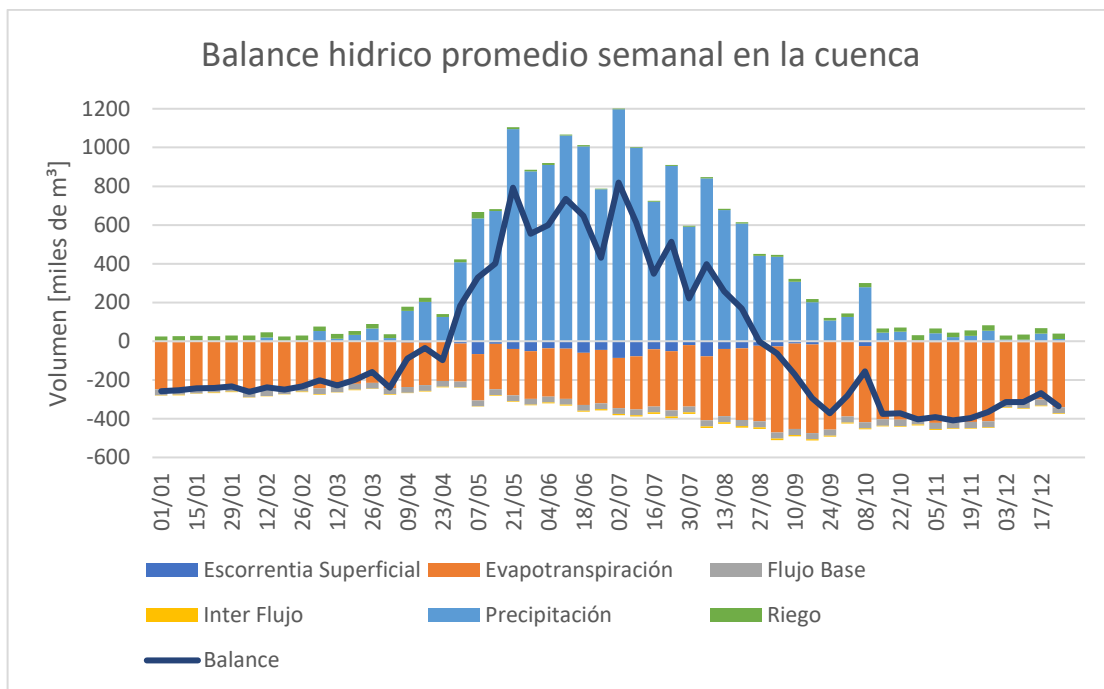


Figura 7.28: Balance hídrico promedio semanal en la cuenca

7.3. Análisis de resultados

La presente sección busca realizar un análisis crítico de los principales resultados obtenidos de las estaciones de medición en el capítulo V y los principales resultados en la sección 7.2 comparando las metodologías utilizadas, identificando deficiencias y proponer mejoras. La importancia del presente análisis radica en que, si bien el modelo hidrológico es capaz de entregar muchos resultados, existen muy pocas fuentes de información observada para calibrar el modelo a través de las mediciones de bondad de ajuste.

7.3.1. Análisis de estaciones de medición

La estación de medición pluviométrica fue capaz de registrar 5 eventos de precipitación obteniendo resultados del orden de magnitud con la estación meteorológica más cercana Lago Peñuelas (ver figura 5.18) presumiendo que se puede confiar en estos resultados, sin embargo, existen dos ámbitos críticos que podrían producir imprecisiones en los resultados los cuales se detallan a continuación:

- **Registro de posición de cubeta cada 1 segundo:** Actualmente el código fuente del pluviómetro (ver Anexo 3) está diseñado para registrar la posición de la cubeta basculante cada un segundo, esto podría producir que se esté no considerando cambios de posición en la cubeta ante crecidas, esto se puede explicar en el siguiente ejemplo: Si a la cubeta ingresan entre 5 [ml] y 7,5 [ml] en menos de un segundo, la posición inicial y final de la cubeta será lo mismo, lo que produciría que el pluviómetro registre 0 cambios de posición y con ello precipitación 0 en ese espacio de tiempo tal como lo ejemplifica la figura 7.29.

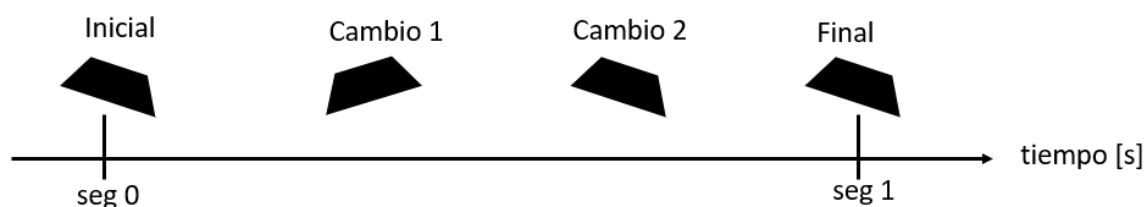


Figura 7.29: Cambios de posición de cubeta basculante

Las opciones de mejora de este problema son diseñar cubetas más grandes, necesitando una mayor cantidad de agua para poder producir cambios de movimiento y/o complejizar el código fuente de una forma en que reduzca el espacio de tiempo en que se registra la posición de la cubeta cuando existan crecidas en las precipitaciones.

- **Comparaciones con estaciones meteorológicas cercanas:** Las comparaciones de resultados entre estaciones aumentarían su valor de confianza si se está seguro de que ambas estaciones miden de forma correcta las precipitaciones, sin diferencias entre ellas. Se desconoce la forma y complejidad de los componentes de la estación meteorológica de Lago Peñuelas u otras, por otra parte, se conoce que el pluviómetro diseñado es un sistema simplificado, de bajo costo y podría tener algunos errores (como el que se presentó anteriormente) que pudiesen afectar en la estimación de la cantidad de lluvia. Una forma de aumentar el nivel de confianza de los datos corrigiendo este problema es instalar un pluviómetro lo más cercano posible a la estación meteorológica con la cual se quieran comparar y analizar las diferencias de resultados.

La estación de medición piezométrica registró solo 32 horas, lo cual es un periodo de tiempo insuficiente para analizar resultados, sin embargo, desde las pruebas de laboratorio se observa una gran sensibilidad a los cambios en los registros obtenidos, una forma de abordar esta problemática es incluyendo un sistema de controladores de amplificación de voltaje con la finalidad de utilizar la totalidad del rango de salida ADC (0-1023) y no solo una parte de este, aumentando la precisión de los resultados. Por otra parte, se propone extender el diseño de la estación piezométrica con la finalidad de incluir registros de nivel subsuperficial, para ello se necesitaría una mayor longitud de tubo y realizar una excavación de pozo. La figura 7.30 muestra el esquema de la obra de medición extendida a nivel subsuperficial.

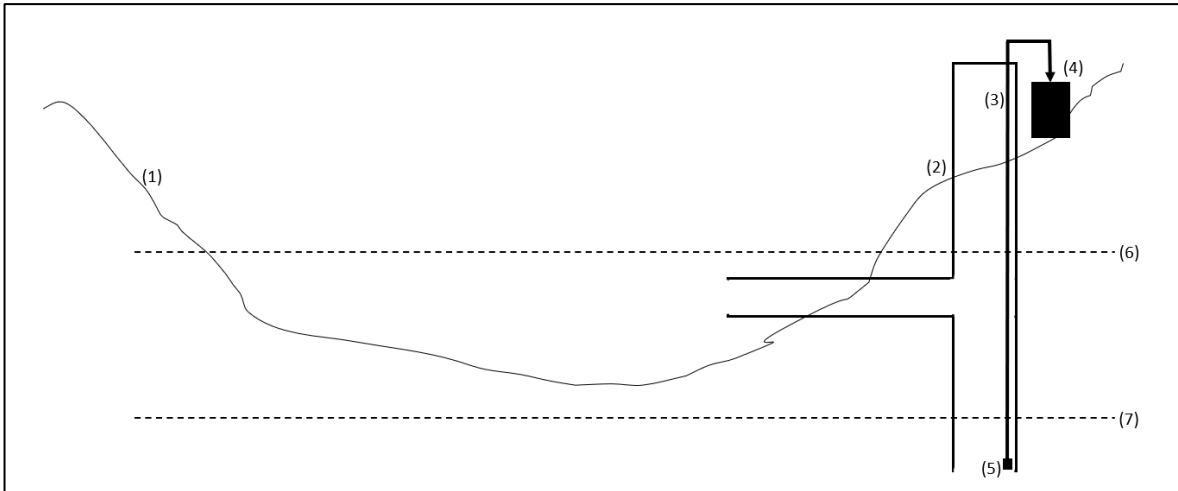


Figura 7.30: Esquema piezómetro subsuperficial

Donde:

- (1) Sección transversal del Estero el Jote.
- (2) Sistema de tubos que permitan el paso de agua.
- (3) Cable para sensor de presión.
- (4) Caja con componentes electrónicos para el registro y almacenamiento de datos.
- (5) Sensor de presión.
- (6) Esquema nivel de agua en posibles crecidas.
- (7) Esquema nivel de agua subterránea disponible.

Además, desde el perfil altimétrico de la figura 4.6 y los derechos de agua subsuperficiales se observa que el acuífero se encuentra en el primer kilómetro del estero el Jote desde el mar, por lo que se podría instalar estaciones cada una determinada longitud la cual permita caracterizar de mejor forma el acuífero y los niveles de este.

Cabe destacar que los resultados obtenidos por la estación piezométrica en la figura 5.9 muestran una variación de 4 [cm] en el periodo de registro, sin embargo, es muy poco probable que eso haya ocurrido, traduciendo ese error en la curva de elevación volumen mostrada en la figura 4.28 se obtiene una variación cercana a los 1000 [m³] lo cual es muy elevado considerando que al humedal solo llega el 1% del caudal disponible aguas arriba y el resto sigue hacia el acuífero. Debido a lo anterior, es necesario mejorar la precisión de las mediciones de la estación piezométrica.

7.3.2. Análisis de caudales

Tal como se observan en las figuras 7.22 y 7.23 los caudales modelados son considerablemente menores que los de VIC, sin embargo, no se puede conocer si el modelo estima de buena manera la estacionalidad de estos, a priori no se observan grandes fluctuaciones con el paso de los meses. Lo anterior conduce a cuestionar la calidad del modelo y la forma en que este obtiene sus resultados.

Una práctica común en la modelación hidrológica es que, a partir de resultados obtenidos con parámetros de uso de suelo iniciales, estos se modifiquen en función de acercar los caudales modelados a los observados, al no existir caudales observados, este proceso no se puede llevar a cabo de forma correcta.

Cabe destacar que con los resultados del modelo es posible identificar cuáles son los factores que controlan el caudal modelado en el medidor, esto se puede lograr, suponiendo que los resultados de evapotranspiración son confiables a partir su comparación con las precipitaciones y el producto PML_V2, Debido a lo anterior y analizando las ecuaciones (5) y (6) se concluyen los ajustes de calibración enunciados en la tabla 7.4.

Tabla 7.4: Parámetros de ajuste de calibración

Ajuste de calibración	Parámetro de control	Valor actual	Impacto en el modelo
¿Las condiciones de la superficie, favorecen u obstaculizan la infiltración?	Factor de resistencia a escorrentía	Ver figura 7.8	Mayores valores reducen la escorrentía superficial y aumentan agua disponible para infiltración.
¿Qué tan rápido se mueve el agua en la capa superior?	C.Z.R [mm/sem]	20-540	Aumentar el valor acorta el tiempo de retención y disminuye la evaporación posible.
¿Cuál es la capacidad de la capa superior para contener agua?	C.A.S [mm]	2000-4000	Inverso a conductividad.
¿Qué tan rápido se mueve el agua a través de la capa profunda?	D.P.F	0,07-0,15	Porcentaje de agua que sale del balde y va hacía el río principal.
¿Cuál es la capacidad de la capa inferior para contener agua?	C.P [mm/sem]	10-50	Aumentar el valor aumenta el tiempo de retención del agua en la capa profunda evitando que vaya hacía el río principal.

Según la tabla anterior, la precisión de los caudales modelados podría mejorarse si se realizan estudios que permitan conocer mejor las características de resistencia y conductividad de la cuenca.

CAPÍTULO VIII

8. Conclusiones

8.1. Comentarios finales

- Se instaló la estación pluviométrica, obteniendo resultados consistentes según las comparaciones con la información de estaciones meteorológicas cercanas, si bien no fue parte del modelo debido al corto tiempo de instalación (4 meses v/s 40 años del modelo) esta puede ser de utilidad para una actualización posterior del modelo, que podría incluir una mejora en la precisión de los resultados del modelo.
- Se consiguió el diseño, construcción e instalación de la estación piezométrica, si bien esta no mide el caudal pasante, actualmente los datos recopilados por la estación permiten obtener la altura de cota de agua para la construcción de la curva Elevación-Volumen ingresada al modelo, además, se obtuvieron mejoras para una posterior extensión de la estación con la posibilidad de medir caudal subsuperficial.
- Se obtuvo un modelo hidrológico con mayor nivel de detalle que el PEGH Casablanca en cuanto a la información de los sitios de demanda y unidades hidrológicas presentes en la cuenca, un ejemplo de esto es el uso del humedal el Jote como elemento de calibración y validación del modelo, este elemento no está incluido en el PEGH Casablanca. Por otra parte, los sitios de demanda SSR Quintay, Golf Sta. Augusta y Uso hum. Sta. Augusta están caracterizados con información observada y recopilada en terreno, a diferencia del PEGH que solo utiliza fuentes de información de percepción remota.
- En cuanto a las demandas evapotranspirativas, el producto PML_V2 es validado para el presente estudio, consiguiendo valores de evapotranspiración total real modelada muy similares al producto, sin embargo, para ello se consideraron los coeficientes de cultivo, factor de resistencia a la escorrentía y otros parámetros que usó el modelo PEGH Casablanca.

8.2. Recomendaciones

- Debido al corto tiempo de instalación de la estación pluviométrica con respecto al rango temporal del modelo hidrológico no es posible realizar evaluaciones del desempeño y precisión de los resultados, para ello se necesitaría un mayor tiempo de registro de datos con mayor cantidad de eventos de precipitaciones, una medida que podría acelerar el proceso de análisis de resultados sería la incorporación de una o más estaciones pluviométricas en zonas estratégicas pudiendo ser estas dentro de la cuenca para observar variaciones en el lugar modelado o en lugares cercanos a las estaciones meteorológicas de comparación (Lago Peñuelas y Casablanca) esto último con el fin de conocer variaciones que puedan ocurrir debido al nivel de complejidad de las estaciones. El último punto podría ser factible de abordar a futuro debido a que el diseño ya se encuentra operativo y el costo de construcción de la obra es bajo.
- Tal como se mencionó en 5.2.5 aumentar la precisión de las mediciones de la estación piezométrica es importante. Esto se justifica debido a que en momentos cuando el humedal se encuentre con una elevación cercana a 80 [cm] o mayor, una variación de registro de 4 [cm] producto de imprecisiones del sensor se puede traducir en diferencias de 800 [m³] este valor podría aumentar del orden de 10 veces si la elevación es de 1 metro, lo que podría resultar en malos resultados de calibraciones de las crecidas.

- Centrar los esfuerzos en estudiar el comportamiento en la parte baja de la cuenca, en especial entre la interacción que pueda ocurrir entre el humedal y el acuífero con énfasis en caracterizar este último elemento sería una mejora considerable al modelo hidrológico actual debido a que es la parte con menor nivel de información de calibración.
- Realizar un análisis de sensibilidad al obtener resultados de evapotranspiración variando los coeficientes de cultivo podría dar más indicios para responder a la interrogativa de los valores de K_c para el suelo forestal y urbano.

Anexos

```

#include "LowPower.h"
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
int conta = 0;
const int chipSelect = 8;
RTC_DS1307 RTC;
File dataFile;
DateTime now;
int SENSOR;

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  RTC.begin();
  if (! RTC.isrunning()) {
    Serial.println("RTC is NOT running!");
    RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__)); }
  Serial.print("Initializing SD card...");
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Card failed, or not present");
    return;}
  Serial.println("card initialized.");
  now = RTC.now();
  dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  dataFile.print("Start logging on: ");
  dataFile.print(now.year(),DEC);
  dataFile.print('/');
  dataFile.print(now.month(),DEC);
  dataFile.print('/');
  dataFile.print(now.day(),DEC);
  dataFile.println(" ");
  dataFile.println("Valor          Time");
  dataFile.close();
}

void loop(void) {
  now = RTC.now();
  for (int i = 0 ; i < 15 ; i++){
    dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
    SENSOR = analogRead(A0);
    if (dataFile) {
      dataFile.print(SENSOR);
      dataFile.print("          ");
      dataFile.print(now.day());
      dataFile.print("/");
      dataFile.print(now.month());
      dataFile.print("/");
      dataFile.print(now.year());
      dataFile.print(" ");
      dataFile.print(now.hour(),DEC);
      dataFile.print(":");
      dataFile.print(now.minute(),DEC);
      dataFile.print(":");
      dataFile.println(now.second(),DEC);
      dataFile.close();
      Serial.println("data stored");
      delay(1000);}
    else {
      Serial.println("error opening datalog.txt");} }
  for (int i = 0 ; i < 450 ; i++)
    LowPower.powerDown(SLEEP_8S, ADC_OFF, BOD_OFF);
}

```

Anexo 1: Código fuente para estación piezométrica

Anexo 2: Costos de materiales de estación piezométrica en CLP

Materiales	Precio	Disponibilidad
Tubo PVC 50 [mm] 1,5m	\$ 5,290	Sodimac
Sensor de presión	\$ 6,890	Alliexpress.com
Cable tipolar para extensión 5 [m]	\$ 3,690	Sodimac
Resina epoxica	\$ 22,500	Falabella
Placa Arduino	\$ 21,990	Arduino.cl
Datalogger	\$ 9,990	MCI Electronics
Pilas 18650 litio	\$ 14,970	Casa Royal
Caja de batería 18650	\$ 1,290	Sodimac
Pilas CR 1220	\$ 1,290	Macrostore
Micro SD 8 Gb.	\$ 3,990	Falabella
Caja Estanca 150x150x80 [mm]	\$ 9,890	Easy
Cables Dupont	\$ 1,790	Falabella
total	\$ 103,570	

```

#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
const int chipSelect = 8;
RTC_DS1307 RTC;
File dataFile;
DateTime now;
int SENSOR;

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  RTC.begin();
  digitalWrite(7,HIGH);
  if (! RTC.isrunning()) {
    Serial.println("RTC is NOT running!");
    RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
    Serial.print("Initializing SD card...");
    if (!SD.begin(chipSelect)) {
      Serial.println("Card failed, or not present");
      return;
    }
    Serial.println("card initialized.");
    now = RTC.now();
    dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
    dataFile.print("Start logging on: ");
    dataFile.print(now.year(),DEC);
    dataFile.print('/');
    dataFile.print(now.month(),DEC);
    dataFile.print('/');
    dataFile.print(now.day(),DEC);
    dataFile.println(" ");
    dataFile.println("Valor          Time");
    dataFile.close();
  }

  void loop(void) {
    now = RTC.now();
    dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
    SENSOR = digitalRead(7);
    if (dataFile) {
      dataFile.print(SENSOR);
      dataFile.print("          ");
      dataFile.print(now.day());
      dataFile.print("/");
      dataFile.print(now.month());
      dataFile.print("/");
      dataFile.print(now.year());
      dataFile.print(" ");
      dataFile.print(now.hour(),DEC);
      dataFile.print(":");
      dataFile.print(now.minute(),DEC);
      dataFile.print(":");
      dataFile.println(now.second(),DEC);
      dataFile.close();
      Serial.println("data stored");
    }
    else {
      Serial.println("error opening datalog.txt");
      delay(1000);
    }
  }
}

```

Anexo 3: Código fuente para estación pluviométrica

Anexo 4: Costos de materiales para estación pluviométrica

Materiales	Precio	Descripción o fuente
Impresión 3D	\$ 7,500	Uso de material y energía
Placa Arduino	\$ 22,990	Arduino.cl
Cables Dupont (3)	\$ 1,000	MCI electronics
Modulo datalogger	\$ 9,990	MCI electronics
Micro SD 2 Gb.	\$ 3,990	Promedio de mercado
Pila CR 1220	\$ 1,290	Promedio de mercado
Imán de neodímio	\$ 2,640	La casa del imán
Sensor efecto hall	\$ 1,000	Promedio de mercado
Cable de alimentación USB A-B	\$ 1,990	Promedio de mercado
Adaptador USB	\$ 2,490	Promedio de mercado
Total	\$ 54,880	

Referencias

- [1] DGA, Informe ejecutivo Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca del Estero Casablanca, diciembre 2021
- [2] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia - CR2, Informe a las naciones, La megasequia: una lección para el futuro, Informe a la Nación: La megasequia en Chile 2010-2019
- [3] Montaña. B, Crecimiento de la población y escasez hídrica, Congreso nacional del agua 2019.
- [4] SEREMI Obras publicas Región de Aysen: DGA del MOP impulsa elaboración de Planes Estratégicos de Gestión Hídrica con comunidades en las Cuencas del río Aysén, río Baker y río Pascua. Enero 2022.
- [6] Dirección General de Aguas, DGA noticias. Disponible en línea: [Ministerio de Obras Públicas - Dirección de General de Aguas \(mop.gob.cl\)](http://Ministerio de Obras Públicas - Dirección de General de Aguas (mop.gob.cl)) (consultado el 7 de abril de 2022).
- [8] DGA, Anexo H: Modelación Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca del Estero Casablanca, diciembre 2021.
- [9] ONU, CEPAL: Guía análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial, Julio 2013.
- [10] Gomez, A. Caracterización de una cuenca: principios y métodos, Febrero, 2020.
- [11] Centro de Información de Recursos Naturales, CIREN, Informe final Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional, diciembre 2014
- [12] Schumm, S.A. Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological Society of America Bulletin, 1956.
- [13] Horton, D. Corrección de sesgo de temperature y precipitación en simulaciones de modelos climáticos, 2014.
- [14] Strahler, A. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins, and Channel Networks, 1964.
- [15] T. Davie, Fundamentals of Hydrology, New York, NY: Routledge, 2008.
- [16] Cabrera. J. “Modelos hidrológicos” Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2012.
- [17] Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Santiago, Boston 2009.
- [20] DGA, “Anexo I: Evaluación Red Hidrometrica Nacional – Informe Final” 2013.
- [21] León, A; Hernández, A; Garrido, M. Captación de lluvia con pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento, 2013.
- [22] Alonso Sarria, F, “Sistemas de Información Geográfica” 2013.
- [23] Universidad Veracruzana “Manual Operativo para la Utilización del Sistema de información geográfica Quantum GIS.
- [27] Instituto Nacional de Estadísticas, División político-administrativa y censal, Enero 2019.
- [29] Zhang, Y; Kong, D; Chiew, F; Yang, Y, PML_V2 0.1.7 Global evapotranspiration and gross primary production (07/2021-08/2018); 2019
- [32] DGA, Balance de gestión integral, 2014
- [36] Durá, J; Fernandez, M; Lopes-Geta, J; Mateos, R; Robledo, P, Las aguas subterráneas y los campos de golf. Una aproximación integradora, Madrid, 2003
- [38] Biblioteca del Congreso nacional de Chile, Determinación y gestión de caudales ecologico: Experiencia extranjera, 2017.

[39] Molleto Lobos, I; Matta Bader, C; Barichivich, J, Performance of satellite-based evapotranspiration models in temperate pastures of southern Chile, 2020.

[40] Ministerio de Obras Públicas, Actualización del Balance hídrico nacional, 2017.

[42] Lobos, J. Detección y localización de fugas en redes de distribución de agua potable en una gran ciudad de Chile mediante algoritmo de clasificación de redes neuronales, 2022.

Linkografía

- [5] Funciones DGA. [Ministerio de Obras Públicas - Dirección de General de Aguas \(mop.gob.cl\)](http://mop.gob.cl)
- [7] Plan Estratégico de Gestión Hídrica Conjunto de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico, Información General [Plan Estratégico de Gestión Hídrica – Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico \(peghpuntaarenasyvertientes.cl\)](http://peghpuntaarenasyvertientes.cl)
- [18] SEI, “Descripción de métodos para modelación hidrológica”,(3623) [Tutorial WEAP 08.1.2 - Hidrología, Métodos hidrológicos en WEAP - YouTube](#)
- [19] M.O.P “Glosario Tecnico”, [Glosario Técnico On-line \(registrocdt.cl\)](http://registrocdt.cl)
- [24] [¿Qué es Google Earth Engine? \(cursosgis.com\)](http://cursosgis.com)
- [25] [¿Qué es Arduino? | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea](http://arduino.cl)
- [26] [earth_pro_ds.pdf \(googleusercontent.com\)](http://googleusercontent.com)
- [28] [EXPLORADOR CLIMÁTICO \(cr2.cl\)](http://cr2.cl)
- [30] [Earthdata Login User Registration \(nasa.gov\)](http://nasa.gov)
- [31] [Home — LandsatLook \(usgs.gov\)](http://usgs.gov)
- [33] [Productos grillados | Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia - CR2](http://cr2.cl)
- [34] [Ministerio de Obras Públicas - Dirección de General de Aguas \(mop.gob.cl\)](http://mop.gob.cl)
- [35] [Santa Augusta: el vecino incómodo de Quintay - Vergara 240 \(udp.cl\)](http://udp.cl)
- [37] [Escasez hídrica: ¿Son las plantaciones forestales depredadoras del agua? | Emol.com](http://emol.com)
- [41] [Ecosistemas \(quintaybiodiversidad.cl\)](http://quintaybiodiversidad.cl)