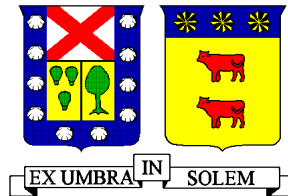


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO CHILE



OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DEL USO DEL EMBALSE LYNCH EN
EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE DE PUNTA
ARENAS

Memoria de titulación presentada por
MIGUEL ÁNGEL CARRASCO FERNÁNDEZ

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Alberto Kresse Zamorano

Profesor Co-Referente
Patricio Catalán Mondaca

Junio 2017

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo optimizar el uso del Embalse Lynch, que constituye la principal fuente de abastecimiento del sistema de producción de agua potable de la ciudad de Punta Arenas, cuya concesión es operada por la Empresa Aguas Magallanes S.A.

El sistema de agua potable de Punta Arenas se abastece desde siete cuencas que hacen sus aportes por medio de captaciones superficiales que pueden ser agrupadas, de acuerdo a su cota, en un subsistema de alimentación gravitacional a la planta de tratamiento de la ciudad, y otro de impulsión o elevación mecánica.

Debido a que en la época estival disminuye la oferta de los ríos, la Empresa, bajo un criterio de seguridad, limita el uso del embalse Lynch (del subsistema gravitacional), incrementando el uso de las fuentes que requieren ser elevadas desde la planta Leñadura, lo que resulta en un aumento de los costos operacionales.

En este contexto, la Empresa ha levantado la necesidad de modelar el comportamiento del embalse Lynch y su relación con las demás fuentes, y así poder disminuir el uso del subsistema de impulsión.

Para realizar el modelo se ha recopilado antecedentes de estudios hidrológicos realizados por el Ingeniero Civil Sr. Fernando Harambour, a partir de los cuales se ha determinado los caudales medios mensuales de las fuentes, y su disponibilidad para distintas probabilidades de excedencia.

Con estos datos, se construye un modelo de simulación operacional con el que se evalúa los costos de operación de tres escenarios: (1) *Actual*, en el que se mantiene lleno el embalse Lynch durante todo el verano, (2) *Mejorado*, en el que se utiliza el agua del embalse de manera controlada durante el verano, y (3) *Acelerado*, en el que se maximiza el uso del agua del embalse a partir de la estimación de recarga pluvial de cada año.

El modelo define la variación del volumen almacenado del embalse a escala mensual y la regulación que genera en el sistema. Mediante consignas de operación se determina cuánta agua puede ser liberada cada mes, en los distintos escenarios, y, consecuentemente, cuánto es el volumen que debe ser elevado desde el sistema de impulsión. El análisis permite tener un manejo sustentable del recurso bajo distintos criterios de riesgo, disminuyendo los costos de producción y haciendo el proceso más eficiente.

Con los resultados de la modelación de cada escenario, y los costos operacionales de la planta elevadora Leñadura, se evalúa el ahorro que significa regular la operación del embalse Lynch con respecto al escenario actual.

Por último, se entregarán recomendaciones para implementar el modelo y sugerencias para mejorar la producción, a partir del diagnóstico realizado de las fuentes actuales de la Empresa.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES GENERALES	1
1.2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	2
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivos Específicos.....	2
1.3	HIPÓTESIS	2
1.4	INFORMACIÓN UTILIZADA Y ALCANCES DEL TRABAJO	3
1.5	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	3
1.6	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	4
2	DESCRIPCIÓN GENERAL	6
2.1	CARACTERÍSTICAS DE LA CIUDAD	6
2.2	CLIMA DE LA ZONA.....	7
2.3	AGUAS MAGALLANES S.A.	7
2.4	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN	8
2.4.1	SISTEMA GRAVITACIONAL	9
2.4.1.1	Río Las Minas.....	9
2.4.1.2	Embalse Lynch	10
2.4.2	SISTEMA DE IMPULSIÓN	12
2.4.2.1	Río Leñadura	12
2.4.2.2	Río Tres Brazos.....	13
2.4.2.3	Lago Parrillar	13
2.5	PLANTA DE TRATAMIENTO	14
2.6	ESQUEMA DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN.....	16
3	CAPACIDAD DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO	17

3.1	ANTECEDENTES DE LAS FUENTES	17
3.2	CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS	17
3.2.1	Procedimiento	17
3.2.2	Cuencas que abastecen la ciudad	19
3.2.3	Oferta natural y conjunta.....	20
3.3	CAPACIDAD DE LAS FUENTES.....	21
4	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO	25
4.1	CONSIDERACIONES GENERALES	25
4.2	FUNCIONAMIENTO ACTUAL	25
4.2.1	Variación del volumen del embalse Lynch.....	26
4.2.2	Volúmenes que ingresan a la PTAP	27
4.2.3	Costos de la PEAP	28
4.3	RESTRICCIONES Y PRIORIDADES DEL SISTEMA.....	29
4.3.1	Demanda de la ciudad	30
4.3.2	Aspectos técnicos del sistema.....	31
4.3.2.1	Sistema gravitacional.....	32
4.3.2.2	Uso del sistema de impulsión	33
4.4	FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE	35
4.4.1	Curva de Capacidad	35
4.4.2	Balance Hídrico.....	36
4.4.3	Volumen de reserva.....	37
4.4.4	Volumen de salida	38
4.5	PROPUESTAS DE OPERACIÓN	38
5	SIMULACIÓN OPERACIONAL DEL SISTEMA.....	41
5.1	ANTECEDENTES DE LA SIMULACIÓN	41
5.2	SIMULACIÓN OPERACIONAL.....	41
5.2.1	Pasos del Modelo	42
6	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	48
6.1	ESCENARIO ACTUAL.....	49
6.1.1	Variación del Embalse – Escenario <i>Actual</i>	49

6.1.2	Oferta vs Demanda mensual – Escenario <i>Actual</i>	50
6.1.3	Análisis - Escenario <i>Actual</i>	51
6.2	ESCENARIO MEJORADO.....	53
6.2.1	Variación del Embalse – Escenario <i>Mejorado</i>	53
6.2.2	Oferta vs Demanda mensual – Escenario <i>Mejorado</i>	54
6.2.3	Análisis Escenario <i>Mejorado</i>	55
6.3	ESCENARIO ACELERADO.....	57
6.3.1	Variación del embalse – Escenario <i>Acelerado</i>	57
6.3.2	Oferta vs Demanda mensual – Escenario <i>Acelerado</i>	58
6.3.3	Análisis Escenario <i>Acelerado</i>	59
6.4	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS	61
6.4.1	Volumen de Salida del Embalse	61
6.4.2	Volumen de elevación.....	62
6.4.2.1	PEAP Leñadura	62
6.4.2.2	PEAP Parrillar.....	63
6.4.2.3	Volumen total de elevación.....	64
7	EVALUACIÓN DE COSTOS, RESTRICCIONES Y RECOMENDACIÓN DE OPERACIÓN.....	65
7.1	ANÁLISIS DE COSTOS.....	65
7.1.1	Año 2015	66
7.1.2	Año 2020	67
7.1.3	Año 2025	69
7.1.4	Año 2030	70
7.2	RESTRICCIONES Y CONSIDERACIONES OPERATIVAS.....	72
7.3	ELECCIÓN DEL ESCENARIO.....	74
	CONCLUSIONES	77
	REFERENCIAS.....	79
	ANEXOS	80
	ANEXO A: RESUMEN DE LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE	81
	ANEXO B: CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL	83

ANEXO C: CAPACIDAD ACUEDUCTO DE DESCARGA.....	84
ANEXO D: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	87
ANEXO E: DATOS OPERACIONALES.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Región de Magallanes y Antártica Chilena – Ciudad de Punta Arenas	6
Figura 2.2: Esquema de los subsistemas de producción	9
Figura 2.3: Acueducto río Las Minas – Captación Chorrillo Lynch.....	10
Figura 3.3: Perfil Longitudinal del Acueducto de Descarga del Embalse.....	10
Figura 3.4: Confluencia captaciones Lynch y Las Minas	11
Figura 3.5: Captaciones del Sistema Gravitacional.....	12
Figura 3.6: Captaciones del Sistema Impulsión	14
Figura 3.7: Esquema del Sistema de Agua Potable.....	16
Figura 4.1: Cuencas Bajo Estudio	19
Figura 5.1: Balance Hídrico del Embalse Lynch.....	36
Figura 5.2: Volumen de Salida	38
Figura 5.1: Algoritmo de Simulación.....	47
Figura 7.1: Estado de las Captaciones Tres Brazos y Leñadura – Visita a terreno 26/11/15	72
Figura 7.2: Estado de la Captación Las Minas – Visita a terreno 26/11/15.....	73
Figura C.0.1: Obra de Toma del Embalse Lynch	85
Figura C.0.2: Planta Obra de Toma del Embalse Lynch	86
Figura C.0.3: Inicio Acueducto de Descarga del Embalse Lynch.....	86

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Precipitación y Temperatura mensual	7
Gráfico 3.1: Curva de Variación Estacional – Río Las Minas.....	21
Gráfico 3.2: Curva de Variación Estacional – Chorrillo Lynch.....	22
Gráfico 3.3: Curva de Variación Estacional – Estero Ciervo Sur	22
Gráfico 3.4: Curva de Variación Estacional – Estero Ciervo Norte	22
Gráfico 3.5: Curva de Variación Estacional – Cuenca Embalse Lynch.....	23
Gráfico 3.6: Curva de Variación Estacional – Río Tres Brazos.....	23
Gráfico 3.7: Curva de Variación Estacional – Río Leñadura	23
Gráfico 4.1: Variación del volumen del embalse Lynch.....	26
Gráfico 4.2: Aporte de las captaciones	27
Gráfico 4.3: Proyección de demanda [L/s]	30
Gráfico 4.4: Demanda Mensual de Agua Potable 2015 - 2030.....	31
Gráfico 4.5: Curva de Capacidad del Embalse Lynch.....	35
Gráfico 4.6: Escenarios de Variación del Volumen de Reserva.....	40
Gráfico 6.1: Volumen Liberado - Escenario Actual.....	51
Gráfico 6.2: Volumen PEAP Leñadura - Escenario Actual.....	52
Gráfico 6.3: Volumen PEAP Parrillar - Escenario Actual.....	52
Gráfico 6.4: Volumen Liberado - Escenario Mejorado.....	55
Gráfico 6.5: Volumen PEAP Leñadura - Escenario Mejorado.....	56
Gráfico 6.6: Volumen PEAP Parrillar - Escenario Mejorado.....	56
Gráfico 6.7: Volumen Liberado - Escenario Acelerado	59
Gráfico 6.8: Volumen PEAP Leñadura - Escenario Acelerado.....	60
Gráfico 6.9: Volumen PEAP Parrillar - Escenario Acelerado	60
Gráfico 6.10: Comparación Escenarios - Volumen de Salida	61
Gráfico 6.11: Comparación Escenarios - Volumen PEAP Leñadura.....	63
Gráfico 6.12: Comparación Escenarios - Volumen PEAP Parrillar	63
Gráfico 6.13: Comparación Escenarios - Volumen Total de Elevación.....	64
Gráfico 7.1: Costos operacionales – Año 2015.....	66

Gráfico 7.2: Volúmenes totales de elevación – Año 2015.....	66
Gráfico 7.3: Costos operacionales – Año 2020.....	67
Gráfico 7.4: Volúmenes totales de elevación – Año 2020.....	68
Gráfico 7.5: Costos operacionales – Año 2025.....	69
Gráfico 7.6: Volúmenes totales de elevación – Año 2025.....	69
Gráfico 7.7: Costos operacionales – Año 2030.....	70
Gráfico 7.8: Volúmenes totales de elevación – Año 2030.....	71
Gráfico 7.9: Diferencia de costos operacionales c/r al escenario Actual – Año 2020 ...	74
Gráfico 7.10: Diferencia de costos operacionales c/r al escenario Actual – Año 2025 .	75
Gráfico 7.11: Diferencia de costos operacionales c/r al escenario Actual – Año 2030 .	75
Gráfico C.0.1: Capacidad de Porteo del Acueducto de Descarga	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Clientes Aguas Magallanes S.A.	8
Tabla 3.1: Estaciones Fluviométricas.....	18
Tabla 3.2: Estaciones Pluviométricas.....	18
Tabla 3.3: Cuencas que Abastecen Punta Arenas.....	20
Tabla 3.4: Oferta Natural y Conjunta [m ³ /s].....	20
Tabla 4.1: Energía eléctrica PEAP Leñadura.....	28
Tabla 4.2: Volumen y costo de elevación PEAP Leñadura	29
Tabla 4.3: Capacidad de Producción de las Captaciones.....	31
Tabla A.0.1: Captaciones Superficiales	81
Tabla A.0.2: Conducciones y Canalizaciones Sistema Gravitacional	81
Tabla A.0.3: Conducciones Sistema Impulsión	82
Tabla A.0.4: Plantas Elevadoras	82
Tabla A.0.5: Estanque de Producción	82
Tabla A.0.6: Planta de Tratamiento de Agua Potable	82

OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DEL USO DEL EMBALSE LYNCH EN EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE DE PUNTA ARENAS

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

Desde el año 2004 la Empresa de servicios sanitarios Aguas Magallanes S.A. es la encargada de la producción y distribución de agua potable y también de la recolección, tratamiento y disposición de las aguas servidas en la XII región de Magallanes y Antártica Chilena, específicamente en las localidades de Punta Arenas, Puerto Natales, Porvenir y Puerto Williams. El presente estudio se enfoca en el sistema productivo de agua potable de la ciudad de Punta Arenas, capital de la región, ubicada sobre el lado oriente de la península de Brunswick en el borde continental del estrecho de Magallanes.

El sistema productivo de la Empresa en Punta Arenas, cuenta con captaciones superficiales cuyas aguas son conducidas hacia la planta de tratamiento de agua potable de la ciudad de dos formas: gravitacional y por impulsión o elevación mecánica. Las fuentes que abastecen de forma gravitacional la planta de tratamiento son el río Las Minas, el chorrillo Lynch y el embalse Lynch; mientras que el sistema de impulsión tiene como fuentes el lago Parrillar y los ríos Tres Brazos y Leñadura, que elevan las aguas captadas al tratamiento a través de la planta Leñadura.

En los meses de verano, Aguas Magallanes S.A. ha limitado el uso del embalse Lynch para que, con la recarga natural, se mantenga cerca de su nivel máximo de aguas, lo que le ha permitido contar con un volumen de seguridad hacia el final del período de verano, minimizando el riesgo de uso de la fuente Parrillar, que es la más cara y compleja del sistema de producción. Esta acción, sin embargo, ha hecho aumentar la elevación de las otras fuentes (desde la planta Leñadura), para garantizar la continuidad del servicio, incrementando el costo de producción global del sistema.

En este escenario, se desarrolla un modelo a escala mensual que simula la operación del embalse Lynch, el cual evalúa bajo distintos pronósticos de precipitación y para una demanda proyectada hacia el año 2030, el mejor escenario de funcionamiento.

La elección del escenario se realiza en base a los costos de operación asociados al uso de las plantas elevadoras Leñadura y Parrillar, con el propósito de hacer un mejor uso del recurso, garantizando la continuidad y calidad del servicio, y disminuyendo los costos operaciones del sistema.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.2.1 Objetivo General

El estudio tiene como principal objetivo optimizar el uso del embalse Lynch dentro del sistema de producción de agua potable de la ciudad de Punta Arenas, garantizando la continuidad del servicio y disminuyendo el uso de la planta elevadora Leñadura y, consecuentemente, los costos de operación del sistema en su totalidad.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Conocer la disponibilidad del recurso: Determinar la oferta de las fuentes que abastecen la ciudad de Punta Arenas, bajo distintas condiciones meteorológicas, y cómo se relacionan entre ellas.
- Construir una herramienta: Desarrollar un modelo a escala mensual del sistema, que simule la operación de las fuentes en distintos escenarios, para maximizar el uso del embalse Lynch, sin poner en riesgo el abastecimiento de la ciudad.
- Evaluar escenarios de operación: Determinar los volúmenes a elevar desde las fuentes de elevación mecánica, en distintos escenarios, y cuantificar el ahorro que genera la optimización, respecto de la operación actual.
- Elaborar una propuesta: Entregar recomendaciones de operación, integrando los resultados del modelo, con las restricciones operativas y prácticas de su implementación.

1.3 HIPÓTESIS

La optimización del uso del embalse Lynch durante los meses de verano reduce el funcionamiento de la planta elevadora Leñadura, lo que significa menores costos en el sistema de producción.

1.4 INFORMACIÓN UTILIZADA Y ALCANCES DEL TRABAJO

Para llevar a cabo el estudio, se ha recopilado antecedentes del actual proceso productivo de agua potable de la Empresa sanitaria Aguas Magallanes S.A. de la localidad de Punta Arenas, como también información de la hidrología de las cuencas que pertenecen al sistema.

En este estudio no se ha considerado las características físico – química de la calidad del agua ni sus implicancias asociadas al tratamiento del agua, asumiendo una composición equivalente en las distintas fuentes. Puede haber diferencias en la caracterización de las fuentes, pero sólo se dispuso de registros del agua total que ingresa a la planta de tratamiento, sin hacer la distinción de su procedencia. Además, actualmente no se cuenta con estudios que establezcan problemas de calidad en los ríos que componen el sistema productivo.

En este contexto, el estudio se centra en la disponibilidad de agua de los meses de verano, cuando se aumenta el uso del subsistema de elevación, más allá de la calidad del agua captada en cada fuente. En consecuencia, se evalúa el ahorro que pueda generar la optimización del sistema, sobre la base de la disminución de los volúmenes a elevar desde el sistema de impulsión.

1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para comenzar el estudio, se identifica las captaciones de los ríos que forman parte del sistema productivo y los trasvases de las cuencas que recargan el embalse Lynch, y se describe la conducción de las aguas desde las captaciones hasta la planta de tratamiento de agua potable, separando las fuentes de acuerdo a si se abastecen de forma gravitacional o si deben ser elevadas.

Para analizar la capacidad de las fuentes, se utiliza el estudio de “Evaluación Hidrológica de las Fuentes de Abastecimiento de Agua Potable de Punta Arenas, Agosto 2013”, desarrollado por el ingeniero Sr. Fernando Harambour Palma, de amplia trayectoria en estudios hidrológicos de la región. Este estudio se usa para generar las curvas de variación estacional y así determinar el comportamiento, para condiciones de sequía y humedad, de cada una de las cuencas que forman parte del sistema productivo.

Luego, se describe el actual funcionamiento del sistema de producción, específicamente en lo que respecta a la forma en que se abastece la planta de tratamiento de agua potable de la ciudad, y se analiza eventuales modificaciones de la operación actual, de manera de optimizar su funcionamiento. Con esto, se establece alternativas de abastecimiento de acuerdo a la forma en que son conducidas hacia la planta de tratamiento, buscando privilegiar las aguas que escurren gravitacionalmente, debido al

menor costo de producción, y en último lugar, las aguas que requieran ser elevadas ya que significa un costo adicional debido al uso de las plantas elevadoras.

Una vez definida las alternativas de funcionamiento del sistema de producción, se realiza una simulación a escala mensual, específicamente de la operación del embalse Lynch, y se determina la variación en el tiempo del volumen almacenado, definiendo los volúmenes que se pueden extraer de éste, para aumentar la oferta, considerando condiciones de sequía y humedad, de acuerdo a distintas probabilidades de excedencia. Para ello, se realiza un algoritmo que represente las distintas situaciones según el mes en que se encuentre la operación.

Utilizando el algoritmo que simula el comportamiento del volumen del embalse, de acuerdo a su recarga y uso en cada escenario, se entregan criterios de operación según el volumen disponible y el volumen de regulación, y se define los volúmenes de impulsión requeridos, con lo que se construye los análisis de los costos que permiten cuantificar el ahorro que generaría optimizar la operación.

Por último se entregan recomendaciones operativas y propuestas generales para seguir mejorando el proceso productivo de agua potable de la ciudad.

1.6 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Para llevar a cabo el estudio, se considera nueve capítulos cuya descripción y distribución se presenta de la siguiente manera:

Capítulo 1: “Introducción”

Este capítulo describe los antecedentes generales de la evaluación operacional del sistema productivo de agua potable de la ciudad de Punta Arena, en donde se destaca el problema y el aporte que genera la optimización del sistema productivo. También se incluye los objetivos y metodología para llevar a cabo este estudio y su estructuración.

Capítulo 2: “Descripción General”

Se realiza una breve descripción de la ciudad de Punta Arenas de sus características demográficas, geográficas y medio ambientales. También se describe la Empresa Aguas Magallanes S.A. y su relación con la ciudad a través de sus clientes. Además en este capítulo, se incluye una descripción de la infraestructura del sistema productivo separándolo en dos: gravitacional y elevación. Se identifican las fuentes que abastecen la planta de tratamiento, se describe las aducciones e impulsiones, plantas elevadoras de agua potable y las características principales del embalse Lynch.

Capítulo 3: *“Capacidad de las Fuentes de Abastecimiento”*

Se ha tomado como base los informes del Sr. Fernando Harambour Palma y se identifican las cuencas bajo estudio para que de esta forma utilizando los datos de los informes, se determine la oferta de cada una de las fuentes que abastecen la planta de tratamiento. Se analizan los resultados para determinar el régimen que presenta el sistema considerando condiciones de años húmedos y secos.

Capítulo 4: *“Funcionamiento del Sistema Productivo”*

Se describe el funcionamiento actual del sistema productivo para presentar la propuesta de operación, considerando los aspectos técnicos y las limitaciones que posee cada captación junto con la regulación que genera el embalse Lynch. Se establecen criterios que debe seguir el embalse con respecto al volumen de reserva que se define para que opere en un rango seguro y se pueda recargar naturalmente.

Capítulo 5: *“Simulación Operacional del Sistema”*

Considerando el balance hídrico del embalse, en este capítulo se describe el modelo que simula la operación de éste. Se describe, paso a paso, como obtener los volúmenes: disponible, salida y final al término de cada mes de operación, los eventuales rebases y el volumen que tendría que elevar el sistema de impulsión.

Capítulo 6: *“Resultados de la Simulación”*

En este capítulo se presenta los resultados que entrega la simulación de los distintos escenarios para las distintas probabilidades de excedencia en base a la evolución de la demanda. Posterior a ello se realiza el correspondiente análisis haciendo la comparación de los volúmenes que se llegaría elevar con cada planta elevadora.

Capítulo 7: *“Evaluación de Costos, Restricciones y Recomendaciones de Operación”*

Se cuantifica la disminución de los costos de operación generaría optimizar el sistema utilizando de mejor forma las aguas del embalse. Esto se realiza utilizando los datos operacionales entregados por la Empresa acerca del funcionamiento de las plantas elevadoras. También se presentan las restricciones y consideraciones generales de operación, para que finalmente se elija el mejor escenario de operación.

2 DESCRIPCIÓN GENERAL

2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CIUDAD

La ciudad y puerto de Punta Arenas, capital de la XII Región de Magallanes y Antártica Chilena, se encuentra en extremo sur de Chile, sobre el lado oriente de la península Brunswick en la ribera continental del estrecho de Magallanes. Se localiza en las coordenadas 53°09'45" latitud sur y 70°54'29" latitud oeste a 90 [km] del cabo de Froward, lugar continental más austral.

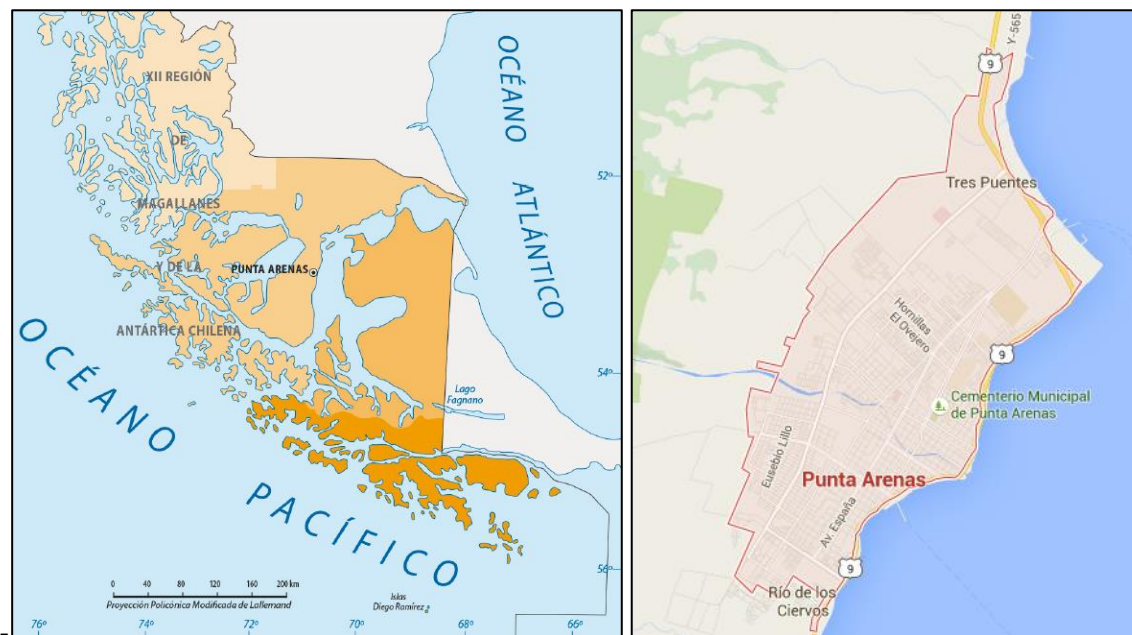


Figura 2.1: Región de Magallanes y Antártica Chilena – Ciudad de Punta Arenas

Fuente: Informe Medio Ambiente 2014 - GoogleMaps

La comuna de Punta Arenas tiene una superficie de 17.846 [km²] con una población de 131.067 habitantes, donde un 2,9% corresponde a población rural.

La ciudad presenta un relieve suave con pequeñas variaciones, aumentando su cota a medida que se aleja de la costa, llegando a alcanzar los 70 [msnm] en los puntos más altos de la ciudad. Se encuentra interrumpida por cauces fluviales, principalmente por el río Las Minas que atraviesa la ciudad de poniente a oriente.

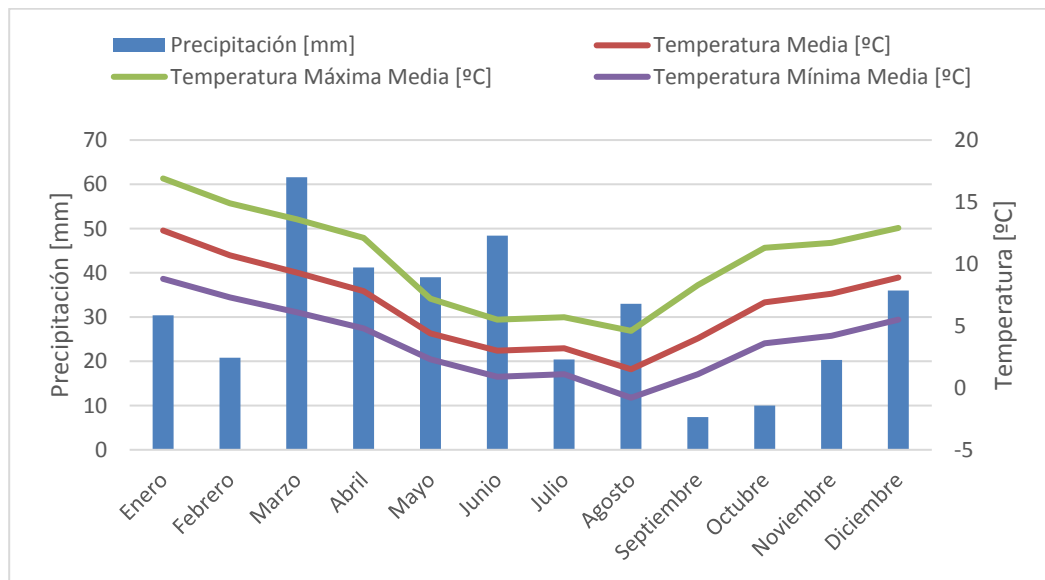
2.2 CLIMA DE LA ZONA

El clima en la zona es del tipo semiárido conocido como un clima estepárico frío, con inviernos largos y fríos, y veranos frescos y cortos. Se caracteriza por una baja precipitación, distribuida a lo largo de todo el año con un valor promedio acumulado anual de 380 [mm] y con precipitaciones nivales durante otoño e invierno.

La región se caracteriza por una nubosidad abundante y con vientos frecuentes del oeste de gran intensidad, que pueden superar los 100 [km/h].

Como se puede ver en el gráfico siguiente, las precipitaciones se registran durante todo el año, aumentando su magnitud entre los meses de junio a septiembre, de igual manera, se puede ver la variación anual del promedio de las temperaturas máximas y mínima. Las menores temperaturas ocurren entre los meses de mayo a agosto, y a partir de este último mes, comienzan a aumentar registrándose en enero las mayores alzas.

Gráfico 2.1: Precipitación y Temperatura mensual



Fuente: Informe medio ambiente 2014

2.3 AGUAS MAGALLANES S.A.

La Empresa tiene como objetivo la producción y distribución del agua potable y la recolección, tratamiento y disposición final de las aguas servidas como también la realización de las demás prestaciones relacionadas con dichas actividades.

Según los datos presentados en su memoria anual del año 2014, la Empresa posee 584 [km] de redes de agua potable y 485 [km] de redes de aguas servidas.

Al 31 de diciembre de 2014, contaba con un total de 50.227 clientes en las cuatro localidades que presta sus servicios. Cuenta con una cobertura de agua potable del 100% y del 98,5% en aguas servidas en la localidad de Punta Arenas.

La distribución de clientes por localidad se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 2.1: Clientes Aguas Magallanes S.A.

Clientes	Totales
Punta Arenas	47.006
Puerto Natales	2.806
Porvenir	73
Puerto William	342
Total	50.227

Fuente: Memoria anual 2014 Aguas Magallanes S.A.

2.4 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN

El sistema de producción de agua potable de Punta Arenas posee captaciones superficiales en esteros, ríos, en un embalse y un lago. El sistema puede separarse en dos de acuerdo a la forma en que son conducidas las aguas para abastecer la planta de tratamiento de Punta Arenas. Se denomina sistema gravitacional a las aguas de las fuentes que son conducidas gravitacionalmente y se denomina al sistema de impulsión a las aguas que requieren elevación mecánica. De forma esquemática en la figura siguiente se presenta la infraestructura del sistema de producción.

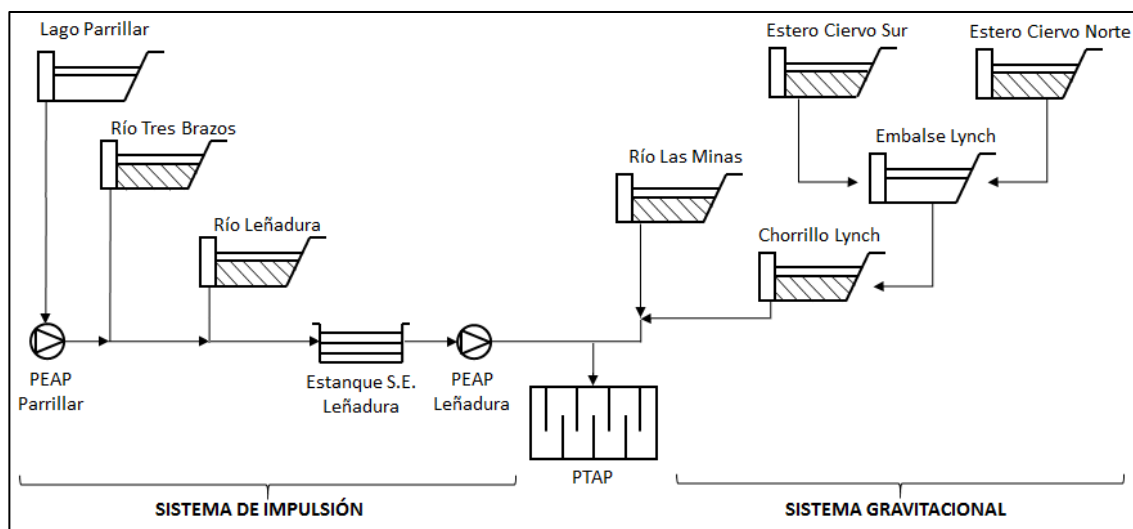


Figura 2.2: Esquema de los subsistemas de producción

2.4.1 SISTEMA GRAVITACIONAL

Las principales fuentes que abastecen la planta de tratamiento de agua potable de forma gravitacional son el río Las Minas, el chorrillo Lynch y el embalse Lynch, que a su vez recibe trasvases de los esteros Ciervo Norte y Ciervo Sur por medio de sus respectivas bocatomas. Las aguas del embalse son descargadas a un lecho natural que se le conoce como el chorrillo Lynch, que aguas abajo confluye con las aguas captadas del río Las Minas para ser conducidas a la planta de tratamiento.

2.4.1.1 Río Las Minas

La captación del río Las Minas se encuentra al poniente de la ciudad, en la ribera oeste a 6 [km] aguas arriba de su desembocadura al Estrecho de Magallanes. La captación es de tipo superficial con barrera frontal de hormigón armado de 18 [m] de largo por 3,2 [m] de alto y cuenta con dos desarenadores primarios. Tiene un caudal de diseño de 0,560 [m³/s] con una capacidad de producción efectiva de 0,500 [m³/s]. Existen derechos de aprovechamiento consuntivo, permanentes y de uso continuo por 0,400 [m³/s].

Las aguas captadas en la bocatoma son conducidas por un acueducto de asbesto cemento de 500 [mm] de diámetro y 350 [m] de longitud. Luego, descargan en un canal rectangular de hormigón de 800 [mm] de ancho y 240 [m] de largo en donde confluyen con las aguas de la captación Lynch provenientes del chorrillo Lynch.

Las aguas que confluyen del río Las Minas y del chorrillo Lynch pasan por un desarenador secundario, luego a la cámara de carga y a través de tres conducciones paralelas entre sí son llevadas hasta la planta de tratamiento.



Figura 2.3: Acueducto río Las Minas – Captación Chorrillo Lynch

Fuente: Elaboración propia - Visita a terreno 26/11/15

2.4.1.2 Embalse Lynch

El embalse Lynch se encuentra al sur poniente de Punta Arenas a una distancia de 7,5 [km]. Cuenta con una torre de hormigón de 12 [m] de alto. El embalse posee una presa principal de 220 [m] de longitud y 14 [m] de alto y dos presas auxiliares que vierten las aguas automáticamente cuando se llega a su máxima capacidad al río Los Ciervos sin ser aprovechadas. El área requerida para el embalse es de 33.1 [ha] con un volumen aprovechable de 1.087.060 [m³].

La captación de las aguas almacenadas se produce por medio de dos tubos de acero de 300 [mm] de diámetro ubicados a 3,9 [m] del fondo. Las aguas son descargadas al cauce natural chorrillo Lynch a través de un acueducto de hormigón de 700 [mm] de diámetro con un dissipador de energía de tipo pantalla (“baffle”) a la salida del tramo.

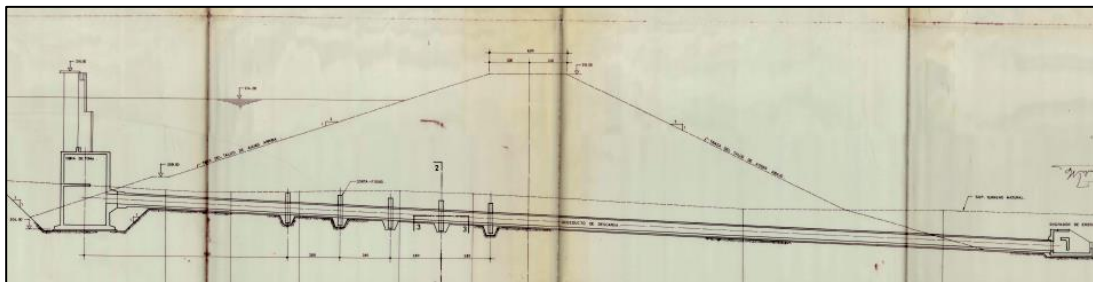


Figura 2.4: Perfil Longitudinal del Acueducto de Descarga del Embalse

Fuente: Aguas Magallanes S.A.

Aguas abajo del chorrillo, a 3.500 [m], se llega a la captación Lynch que tiene una barrera de 7 [m] de largo por 2 [m] de alto con una capacidad de producción de 0,380 [m³/s]. Sus

aguas confluyen con la captación del río Las Minas y continúan por el canal de hormigón de 240 [m] de largo descrito anteriormente.



Figura 2.5: Confluencia captaciones Lynch y Las Minas

Fuente: Elaboración propia - Visita a terreno 26/11/15

La recarga del embalse se realiza en forma natural, además del aporte de su cuenca también existen dos trasvases provenientes de los esteros Ciervo Norte y Ciervo Sur.

La bocatoma Ciervo Norte se ubica al poniente del embalse y se realiza por medio de una barrera frontal de hormigón armado de 29,2 [m] de largo y 3,5 [m] de alto, sin desarenador. Sus aguas son conducidas por un canal natural de 400 [m] hasta llegar al embalse. El caudal de diseño es de 0,024 [m³/s] y su capacidad de producción es de 0,018 [m³/s]. Existen derechos de aprovechamiento consuntivo, permanentes y de uso continuo por 0,018 [m³/s].

La bocatoma Ciervo Sur se encuentra a 1.300 [m] al suroeste del embalse, cuenta con una barrera frontal de 8 [m] de largo y 2,7 [m] de alto, sin desarenador. Las aguas derivadas por la captación son llevadas por una aducción de asbesto cemento 300 [mm] de diámetro de 1.300 [m] de largo. El caudal de diseño es de 0,023[m³/s] y capacidad de producción de 0,070 [m³/s]. Existen derechos de aprovechamiento consuntivo, permanentes y de uso continuo por 0,120 [m³/s].

En la Figura 2.6 se indica la ubicación de las captaciones que forman parte del sistema gravitacional junto con el embalse Lynch y la planta de tratamiento.



Figura 2.6: Captaciones del Sistema Gravitacional

Fuente: Google Earth

2.4.2 SISTEMA DE IMPULSIÓN

Las fuentes que forman parte del sistema de impulsión son: los ríos Tres Brazos y Leñadura, y el lago Parrillar. Las aguas extraídas del lago Parrillar son elevadas por la planta elevadora que recibe el mismo nombre que el lago y junto con las aguas de la captación del río Tres Brazos, se acumulan en un estanque de aspiración que asimismo recibe las aguas de la captación del río Leñadura. Desde el estanque, las aguas son impulsadas por la planta elevadora Leñadura hacia la planta de tratamiento.

2.4.2.1 Río Leñadura

La captación superficial del río Leñadura se encuentra a 9 [km] al sur de la ciudad de Punta Arenas. Se realiza a través de una barrera de tierra construida con el mismo material que deja el río. La captación cuenta con dos desarenadores. Las aguas son conducidas por una aducción de asbesto cemento de 350 [mm] de diámetro y 583 [m] de largo hacia el estanque semienterrado de acumulación y aspiración Leñadura cuyo volumen de almacenamiento es de 1.000 [m³].

El caudal de diseño es de 0,065 [m³/s] y la capacidad de producción de 0,150 [m³/s]. Los derechos de aprovechamiento consuntivo de uso permanente y continuo son de 0,200 [m³/s] en total.

Al estanque igualmente llegan las aguas captadas por el río Tres Brazos para ser impulsadas por la planta elevadora Leñadura. Su funcionamiento es con energía eléctrica cuyo caudal de diseño es de 0,358 [m³/s], altura manométrica de 90 [m] y potencia instalada de 853 [kVA] con una demanda de energía de 0,43 [kWh/m³] elevado desde este punto. Las aguas que son elevadas son conducidas hacia la planta de tratamiento a través de una impulsión de acero de 9.235 [m] de largo total.

2.4.2.2 *Río Tres Brazos*

El río Tres Brazos se encuentra a 14 [km] al sur de la ciudad de Punta Arenas. La captación superficial se realiza a través de una barrera frontal de tierra de 8,5 [m] de largo, 1,9 [m] de alto hecha con material que deja el río. La aducción Tres Brazos es de cemento asbesto de 400 [mm] de diámetro y 1.628 [m] de largo y se une con la aducción Parrillar para seguir por la aducción Parrillar – Tres Brazos hasta el estanque Leñadura.

El caudal de diseño es de 0,123 [m³/s] y la capacidad de producción de 0,225 [m³/s] y posee tres unidades de desarenación. Los derechos de aprovechamiento consuntivo de uso permanente y continuo son de 0,455 [m³/s].

2.4.2.3 *Lago Parrillar*

El lago Parrillar con 970 [ha] de superficie se encuentra a 35 [km] al sur poniente de la ciudad y es reserva nacional administrada por CONAF. Sus aguas son conducidas por una aducción de HDPE de 500 [mm] de 221 [m] de largo hasta la planta elevadora que recibe el mismo nombre. La captación del lago tiene una capacidad de producción de 194 [L/s] y derechos de aprovechamiento consuntivo, permanente y continuo por 1,200 [m³/s].

En el lugar, se encuentra la planta elevadora Parrillar, que tiene una potencia instalada de 445 [kVA], altura manométrica de 50 [m] y un caudal de diseño de 0,200 [m³/s]. Su funcionamiento es mediante combustible, ya que no llega la energía eléctrica al sector.

Se elevan las aguas mediante una impulsión de asbesto cemento de 500 [mm] de diámetro y 3.670 [m] de largo para ser conducidas por la aducción Parrillar de 29.172 [m] de largo total. Se une con la aducción Tres Brazos para ser llevadas hacia la planta elevadora Leñadura por la aducción Parrillar – Tres Brazos. Por lo tanto, las aguas que son impulsadas desde Parrillar, también tienen que ser elevadas por la planta Leñadura para llegar al tratamiento.

La dificultad que presenta mantener operativo este sistema y el riesgo asociado a su funcionamiento, debido a la gran extensión de la conducción y el mantenimiento de las distintas unidades mecánicas, significa un alto costo para su operación. Por

consiguiente, la Empresa, antes de utilizar las aguas de lago Parrillar, prefiere utilizar las fuentes de la planta elevadora Leñadura.

En la Figura 2.7 de la página siguiente, se presenta la ubicación de las captaciones que forman parte del sistema de impulsión junto con el Lago Parrillar. Igualmente se ubica el embalse Lynch y la planta de tratamiento para que se pueda apreciar la distancia que se encuentran.

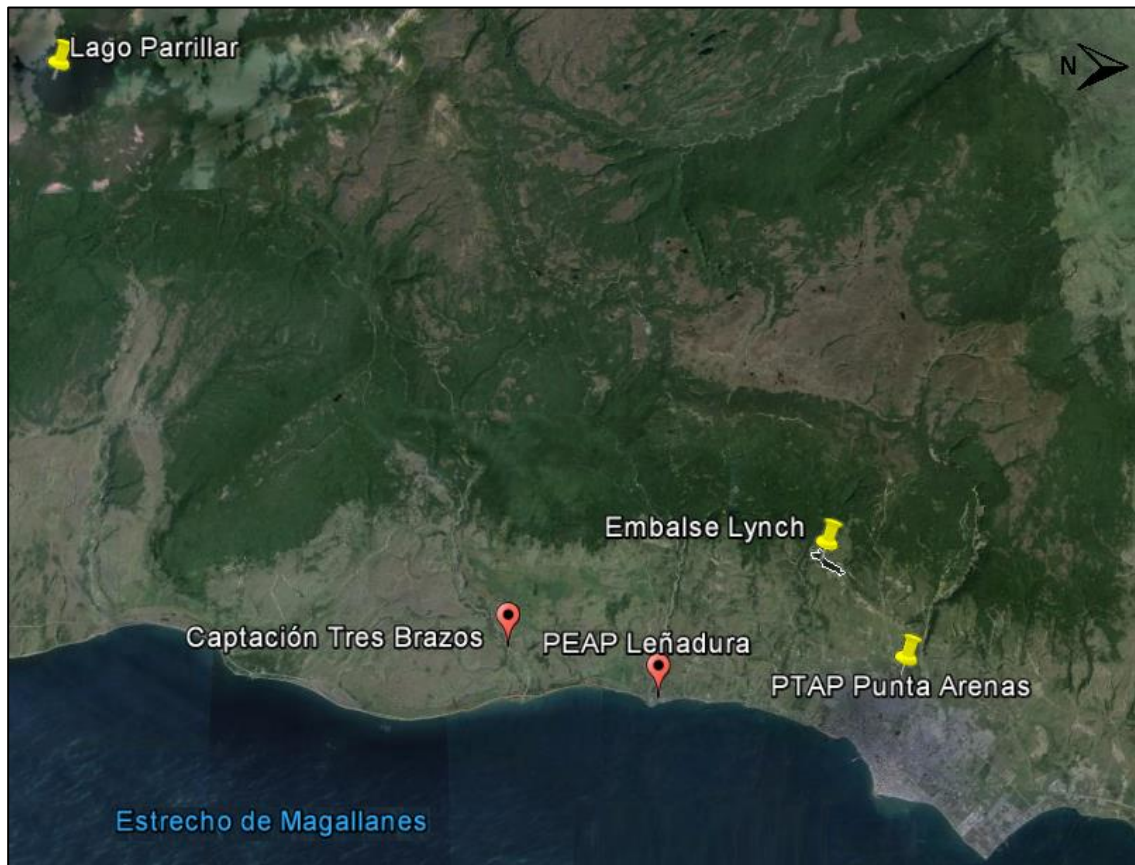


Figura 2.7: Captaciones del Sistema Impulsión

Fuente: Google Earth

2.5 PLANTA DE TRATAMIENTO

El recinto de la planta de tratamiento de agua potable se encuentra al poniente en el límite urbano de la ciudad, aquí confluyen las aguas provenientes del sistema gravitacional y de impulsión.

La planta de tratamiento de filtros rápidos posee un caudal de diseño y actual tratamiento de 0,380 [m³/s]. Los principales elementos a abatir son el manganeso, hierro, turbiedad

y color a través de los procesos de coagulación, floculación, decantación, filtración y desinfección. Se estima que el porcentaje de pérdidas, principalmente al lavado de los filtros, es de un 5%.

En el Anexo A se encuentra un resumen de toda la infraestructura existente que se ha mencionado en este capítulo.

2.6 ESQUEMA DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN

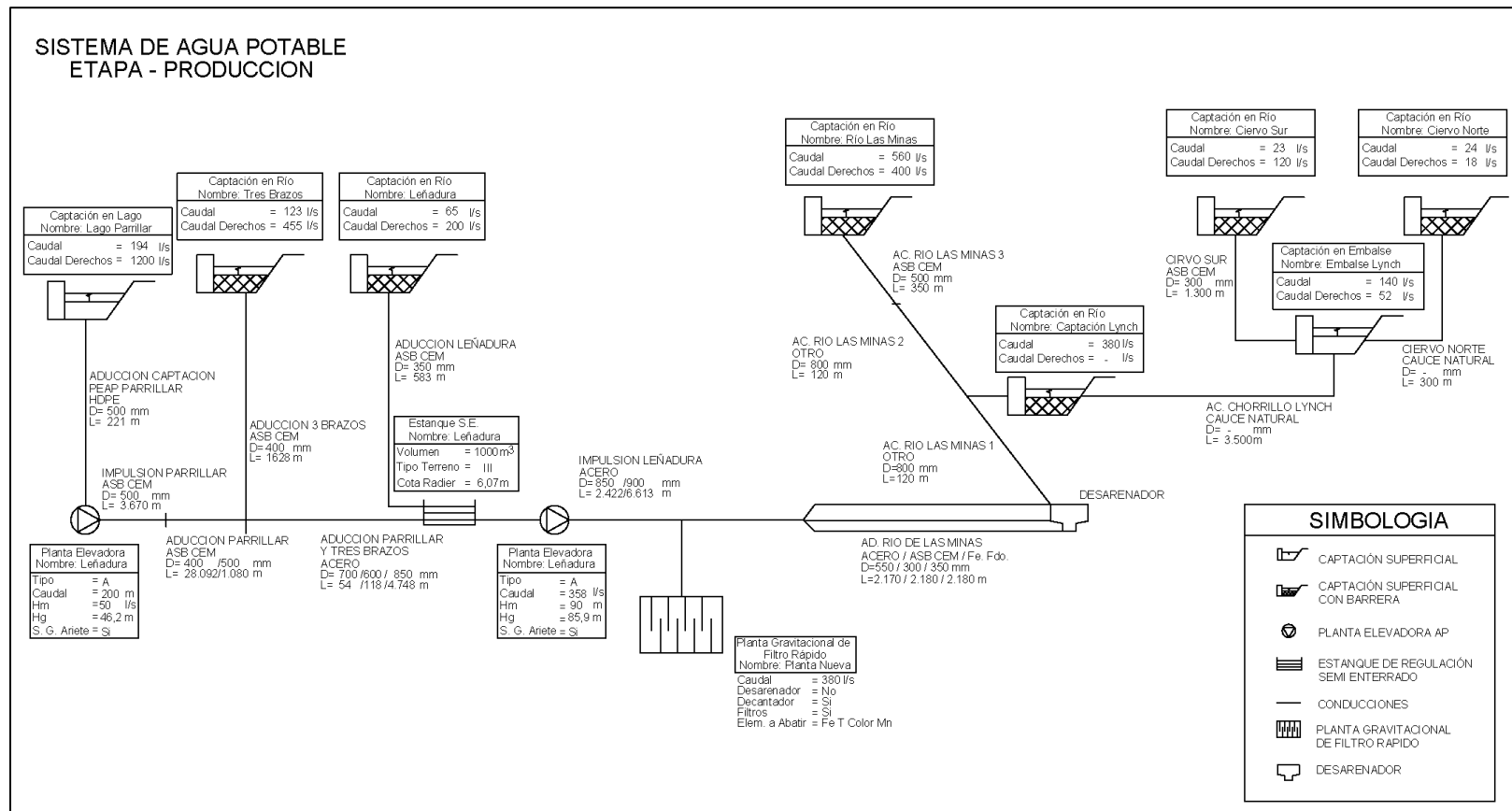


Figura 2.8: Esquema del Sistema de Agua Potable

Fuente: Plan de Desarrollo 2015 - Aguas Magallanes S.A.

3 CAPACIDAD DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO

3.1 ANTECEDENTES DE LAS FUENTES

Para llevar a cabo la evaluación de la capacidad de las fuentes que abastecen la planta de tratamiento se ha tomado como base el estudio realizado por el Sr. Fernando Harambour Palma, destacado Hidrólogo e Ingeniero Civil de la región de Magallanes, denominado: “Evaluación Hidrológica de las Fuentes de Abastecimiento de Agua Potable de Punta Arenas, Agosto 2013”, encargado por la Empresa Aguas Magallanes S.A.

El estudio analiza la oferta natural en conjunto de todas las fuentes, sin abordar el costo asociado a utilizar las fuentes que requieren ser elevadas, ni el nivel de calidad de las aguas, y levanta los aforos históricos de cada río, con lo que se revisa la disponibilidad de las fuentes con distintas probabilidades de excedencia.

El estudio citado determina los caudales medios mensuales generados en las siete cuencas que abastecen la ciudad: los ríos Las Minas, Tres Brazos y Leñadura, los esteros Ciervo Norte y Ciervo Sur, la cuenca del embalse Lynch y la del chorrillo Lynch.

El lago Parrillar como fuente abastecedora no se incluye en la evaluación de su capacidad, ya que presenta una disponibilidad permanente durante todo el año, y sólo cuando el resto de las demás cuencas no satisfacen la demanda, se utiliza.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS

Para determinar las características y determinar la oferta de las cuencas, se utiliza el estudio “Evaluación Hidrológica de las Fuentes de Abastecimiento de Agua Potable de Punta Arenas, Agosto 2013”, se describe brevemente el procedimiento empleado, las cuencas que componen el sistema y su oferta natural y conjunta.

3.2.1 Procedimiento

Como no todas las cuencas que abastecen la ciudad cuentan con estaciones fluviométricas y/o pluviométricas, el estudio de Harambour trabaja en base a los registros de las series de caudales medios mensuales de las estaciones fluviométrica del río Las

Minas, Leñadura, Tres Brazos y San Juan, y las relaciona con los registros pluviométricos de las estaciones Punta Arenas, embalse Lynch, Las Minas y Lago Parrillar. El autor considera estas estaciones como válidas para el análisis, al estar ubicadas en la zona oriente de la península Brunswick.

Una rápida revisión da cuenta que la estación fluviométrica del río Leñadura dispone de un registro escaso, de tan solo 9 años, desde Abril de 1982 a Diciembre de 1991, por lo que se descarta y se considera al río Leñadura sin información fluviométrica.

Tabla 3.1: Estaciones Fluviométricas

Estación	Código BNA	Altura [msnm]	Latitud S	Longitud W	Información
Río Las Minas en Bt. Sendos	12586001-K	185	53°08'17"	70°59'15"	Jun 1982 a 2014
Río Leñadura en Bt. Sendos	12585002-2	0	53°13'18"	70°58'11"	Abr 1982 a 1991
Río Tres Brazos antes Bt. Sendos	12585001-4	0	53°16'44"	70°58'44"	Jun 1982 a 2014
Río San Juan en Desembocadura	12582001-8	8	53°38'60"	70°58'00"	Nov 1980 a 2014

Fuente: DGA

Tabla 3.2: Estaciones Pluviométricas

Estación	Código BNA	Altura [msnm]	Latitud S	Longitud W	Información
Punta Arenas	12586004-4	5	53°07'24"	70°52'38"	Nov. 1973 a 2014
Laguna Lynch	12586005-2	140	53°08'40"	70°58'59"	Dic. 1979 a 2014
Las Minas	12586007-9	155	53°08'39"	70°58'59"	Oct. 1995 a 2014
Lago Parrillar	12582003-4	320	53°24'09"	71°14'59"	Ene. 1990 a 2014

Fuente: DGA

Con la información entregada por la Dirección General de Aguas (DGA), el estudio realiza el relleno y la extensión de los registros de las series de caudales medios mensuales de los ríos Las Minas, Tres Brazos y San Juan de acuerdo a las correlaciones existentes entre las estaciones fluviométricas, pluviométricas y la correlación entre meses.

De la información de los tres ríos que se utilizaron como base para desarrollar el modelo hidrológico, “conducen a afirmar que, en todas las cuencas bajo estudio el año hidrológico se inicia en el mes de Abril” (Fernando Harambour, 2013, p.6).

El mismo autor señala que los tres ríos presentan un comportamiento mensual similar y “en particular cabe destacar la coincidencia y características del estiaje, que es pronunciado, y que el mayor caudal medio mensual se producen en octubre, cuando el deshielo alcanza su apogeo” (Fernando Harambour, 2013, p.7)

3.2.2 Cuencas que abastecen la ciudad

Son siete las cuencas que abastecen a Punta Arenas, éstas se ubican en la vertiente oriental de la península Brunswick. En la Figura 3.1 se muestra la ubicación de las cuencas además de representar la superficie que abarca cada una de ellas.

Producto de las múltiples fuentes y la variabilidad que puedan presentar entre ellas, el autor del estudio hidrológico, realiza un análisis buscando relacionarlas de acuerdo a la dependencia espacial y temporal que exista entre ellas.

Así, utilizando los polígonos de Thiessen, la información fluviométrica y pluviométrica de las estaciones de la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 junto con ecuaciones de transposición de caudales, el análisis permite generar las series de caudales medios mensuales de las siete cuencas que abastecen la planta de tratamiento.

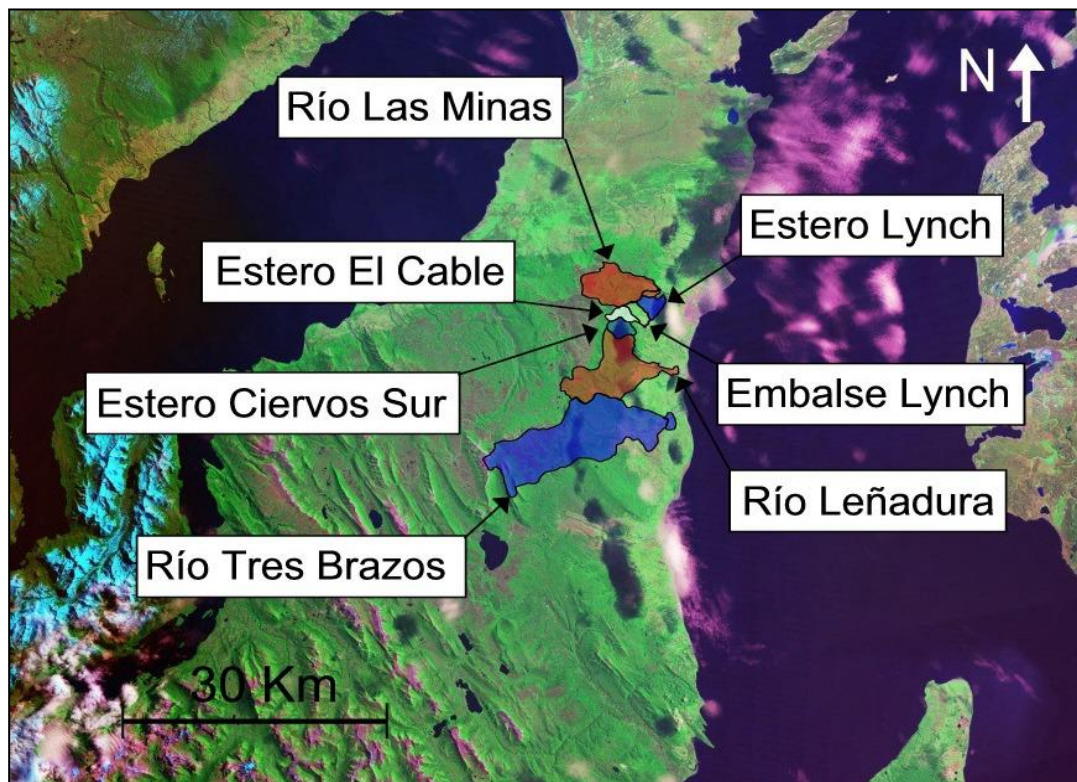


Figura 3.1: Cuencas Bajo Estudio

Fuente: Fernando Harambour. Evaluación Hidrológica de las Fuentes de Abastecimiento de Agua Potable de Punta Arenas, Agosto 2013, p.12.

Las características que posee cada cuenca bajo estudio como la superficie, cota media, precipitación y caudal medio anual se presentan en la Tabla 3.3 de la página siguiente.

Tabla 3.3: Cuencas que Abastecen Punta Arenas

Cuenca	Superficie [Km ²]	Cota media [msnm]	Precipitación [mm]	Caudal medio anual [m ³ /s]
LMB: Río Las Minas en bocatoma	37,5	455	728,6	0,905
TBC: Río Tres Brazos en captación	103,7	370	669,2	2,135
LDC: Río Leñadura en captación	50,5	335	439,8	0,683
CNB: Estero Ciervo Norte en bocatoma	4,3	480	439,8	0,063
CSB: Estero Ciervos Sur en bocatoma	5,5	405	439,8	0,08
ELY: Embalse Lynch	4,1	355	439,8	0,06
ELB: Chorrillo Lynch en bocatoma	5,9	275	686,2	0,134

Fuente: Fernando Harambour. Evaluación Hidrológica de las Fuentes de Abastecimiento de Agua Potable de Punta Arenas, Agosto 2013.

3.2.3 Oferta natural y conjunta

El mismo autor realiza un modelo que relaciona la variabilidad morfológica, espacial y temporal, que existe entre las cuencas en estudio, en la producción de agua potable de la ciudad, cuyo efecto es condicionado por la regulación que genera el embalse Lynch al redistribuir las aguas que llegan a él.

El modelo del autor genera los caudales medios mensuales de las cuencas que no poseen control fluviométrico ni pluviométrico. De esta forma, se obtiene la oferta de las cuencas, sin considerar la capacidad ni la operación de cada captación en el sistema.

La oferta natural y conjunta que resulta de sumar mes a mes los caudales medios mensuales generados por el modelo luego de ajustar una distribución log-normal para distintas probabilidades de excedencias, son presentados por el autor de la siguiente manera.

Tabla 3.4: Oferta Natural y Conjunta [m³/s]

PE	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
85%	1,578	2,373	3,434	3,514	3,033	4,455	4,376	1,404	0,520	0,435	0,478	0,907
90%	1,368	2,121	3,105	3,152	2,736	4,095	3,863	1,225	0,434	0,366	0,418	0,775
95%	1,107	1,797	2,674	2,683	2,348	3,615	3,212	1,001	0,331	0,284	0,342	0,614

Fuente: Fernando Harambour. Evaluación Hidrológica de las Fuentes de Abastecimiento de Agua Potable de Punta Arenas, Agosto 2013, p.31.

La tabla anterior representa la oferta total disponible en las cuencas que abastecen Punta Arenas, sin considerar la capacidad de almacenamiento de los sistemas embalse Lynch y lago Parrillar, Sin embargo, para desarrollar un modelo que simule las alternativas de abastecimiento del sistema de producción es necesario separar la oferta conjunta por fuentes.

Al conocer la oferta de los caudales medios mensuales de cada fuente abastecedora, se puede realizar la simulación privilegiando la oferta del sistema gravitacional, y evaluar con las distintas alternativas de abastecimiento, el beneficio o perjuicio, que implique depender sólo del sistema gravitacional.

3.3 CAPACIDAD DE LAS FUENTES

Los caudales medios mensuales generados por el modelo de Harambour para cada cuenca se resumen en los siguientes gráficos, donde se presentan las curvas de variación estacional para las probabilidades de excedencia (PE) del 50%, 80%, 90%, 95%. Primero se presentan las fuentes del sistema gravitacional y después las del sistema de impulsión. Para poder comparar de mejor forma los gráficos, han sido presentados en dos escalas, los ríos de 0 a 3.000 [L/s] y los esteros de 0 a 240 [L/s]

En el Anexo B se encuentran los valores de cada curva de variación estacional separados por fuente.

Gráfico 3.1: Curva de Variación Estacional – Río Las Minas

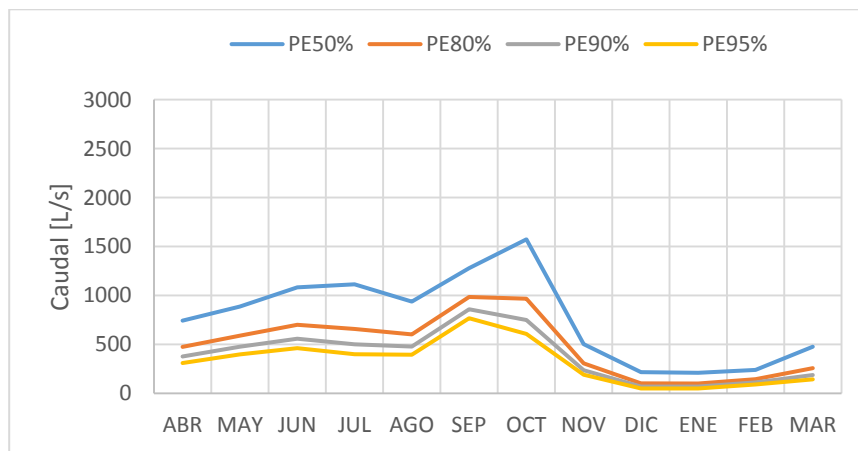


Gráfico 3.2: Curva de Variación Estacional – Chorrillo Lynch

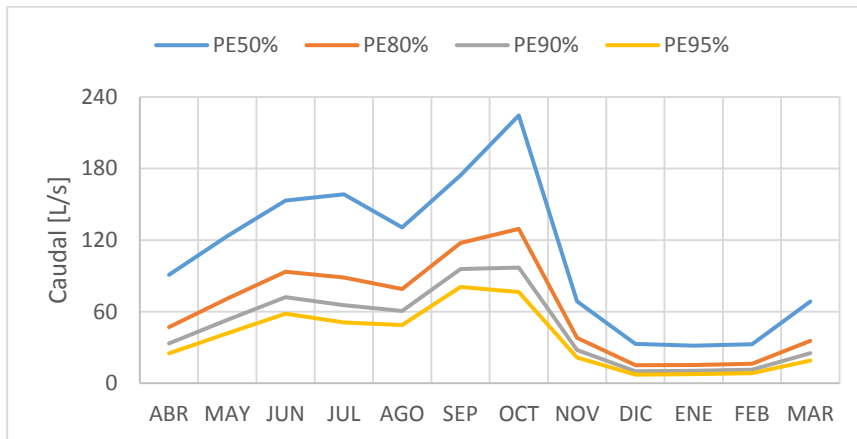


Gráfico 3.3: Curva de Variación Estacional – Estero Ciervo Sur

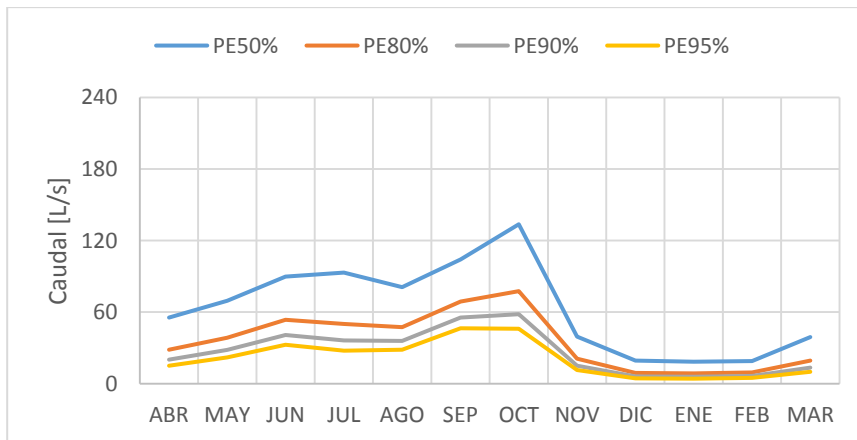


Gráfico 3.4: Curva de Variación Estacional – Estero Ciervo Norte

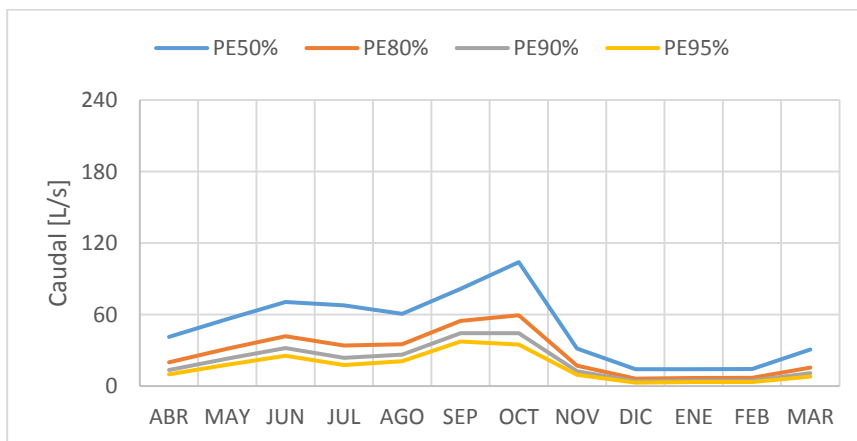


Gráfico 3.5: Curva de Variación Estacional – Cuenca Embalse Lynch

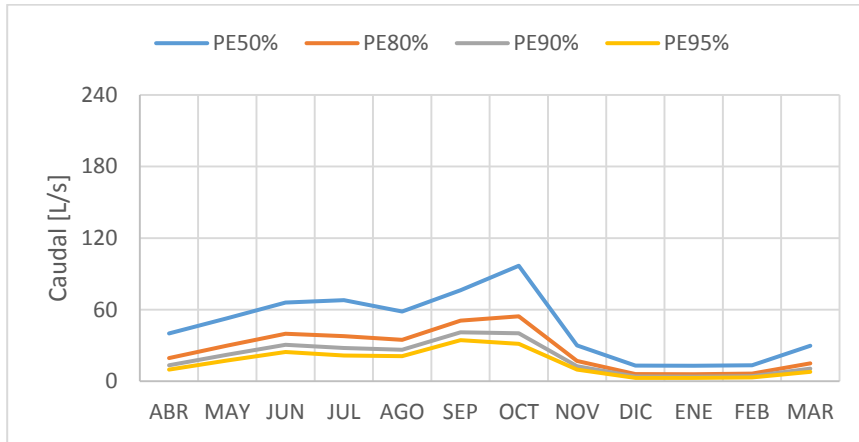


Gráfico 3.6: Curva de Variación Estacional – Río Tres Brazos

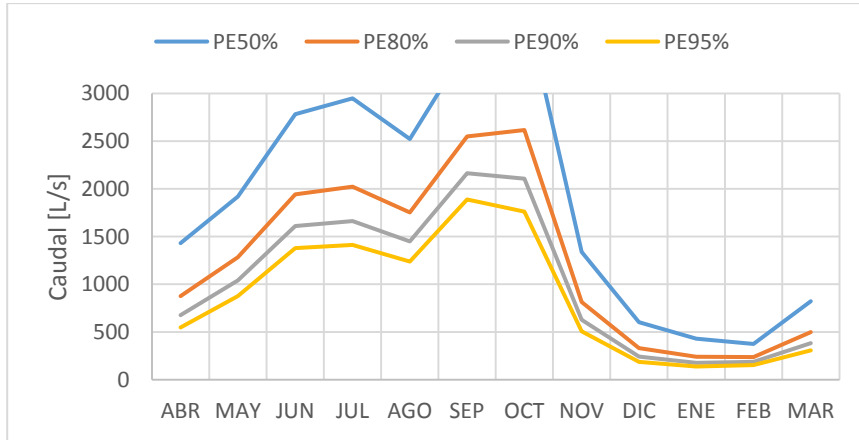
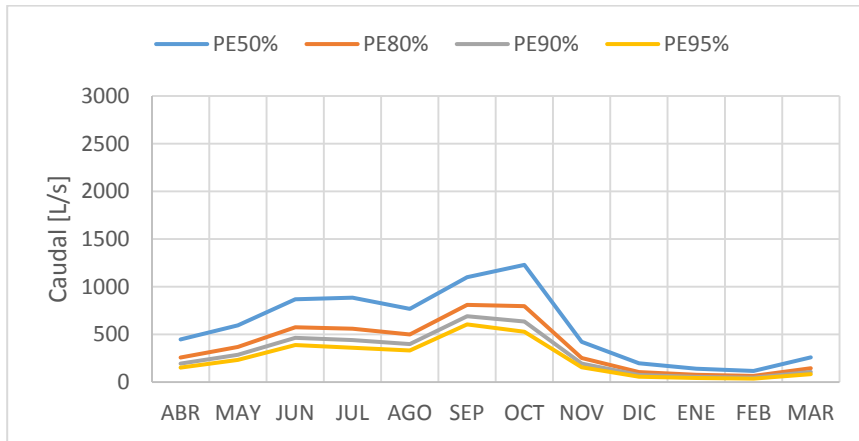


Gráfico 3.7: Curva de Variación Estacional – Río Leñadura



Se desprende de los gráficos anteriores que todas las cuencas que componen el sistema exhiben un comportamiento similar durante todo el año a diferentes escalas, tanto para condiciones de escasez como de abundancia.

También se observa que se manifiesta un régimen nivo – pluvial en el escurrimiento superficial, ya que los mayores caudales medios mensuales se presentan en los meses de Septiembre y Octubre, coincidiendo con la época de deshielos, y se observa que en invierno se registran en menor magnitud producto de las lluvias.

A partir del mes de Octubre se observa que los caudales medios mensuales comienzan a disminuir registrándose los menores caudales entre los meses de Diciembre a Marzo, periodo de menor disponibilidad de las fuentes.

Las curvas de variación estacional de las fuentes del sistema gravitacional, indican que el río Las Minas presenta la mayor disponibilidad, seguido en menor medida del chorrillo Lynch y luego el estero Ciervo Sur. La menor disponibilidad se presenta en el estero Ciervo Norte y el aporte de la propia cuenca del embalse. Entre ellos, no se presentan grandes diferencias.

Con respecto a las fuentes del sistema de impulsión, las curvas de variación estacional en el río Tres Brazos, supera en más de tres veces lo que podría ofrecer el río Leñadura.

Para efectos de este estudio, y de la operación real de la producción en Punta Arenas, en los rangos de demanda de la ciudad, se considera la Laguna Parrillar como una fuente de capacidad ilimitada, que complementaría la oferta en casos aislados, cuando el resto de las cuencas no tengan la capacidad de suministrar más.

La variación estacional observada de las cuencas bajo estudio, cobra importancia a la hora de modelar la operación considerando que el embalse se encuentra lleno en noviembre producto de la recarga natural del invierno y comienzos de primavera.

Cabe mencionar que los caudales presentados no consideran la capacidad que tiene las captaciones, por lo que la oferta real del sistema se ve limitada por las características técnicas de operación de cada captación.

4 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO

4.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Para optimizar el funcionamiento del sistema de producción de agua potable de la ciudad de Punta Arenas, es necesario incorporar las restricciones que poseen las captaciones e identificar los cambios que se pueden generar para mejorar la producción en lo que se refiere a un mejor manejo del recurso, evitando el uso excesivo del sistema de impulsión.

Se describe en este capítulo el funcionamiento actual del sistema productivo y los criterios usados para su definición, y se proponen alternativas de abastecimiento, privilegiando las fuentes del sistema gravitacional.

4.2 FUNCIONAMIENTO ACTUAL

La manera como se abastece la planta de tratamiento de agua potable de la ciudad, depende de la disponibilidad de las fuentes que componen el sistema. En términos generales, el funcionamiento actual utiliza como principales fuentes abastecedoras el río Las Minas y las aguas que descarga el embalse, junto con el aporte que genera la cuenca del chorrillo Lynch, por no requerir de energía para su suministro, sin embargo, en los últimos años se ha adoptado como criterio, mantener un nivel relativamente alto en el embalse Lynch durante todo el verano, de manera de contar con un respaldo o volumen de seguridad que evite el riesgo de tener que activar la fuente del lago Parrillar, en el caso que el resto de las fuentes no permitan cubrir la demanda.

De hecho, de acuerdo a los antecedentes provistos por el Departamento de Operaciones de Aguas Magallanes S.A., el embalse se opera sin un patrón definido, y el control se realiza según la experiencia de los operadores en terreno, que abren o cierran las válvulas de descarga, de forma manual, dependiendo de cuánta agua se necesita en la planta de tratamiento, y mediante una rápida inspección que consiste en ver la recarga del chorrillo Lynch y de los trasvases de los esteros Ciervo Norte y Ciervo Sur. Sin embargo, en la misma Empresa indican que éste conocimiento práctico en base a la experiencia se ha ido perdiendo con la rotación del personal de la Empresa.

Cuando no es factible satisfacer la demanda con el río Las Minas y el aporte del chorrillo Lynch, existen dos posibilidades para aumentar la oferta. La primera es liberar más agua del embalse, y la segunda es utilizar el sistema de impulsión Leñadura con el aporte que

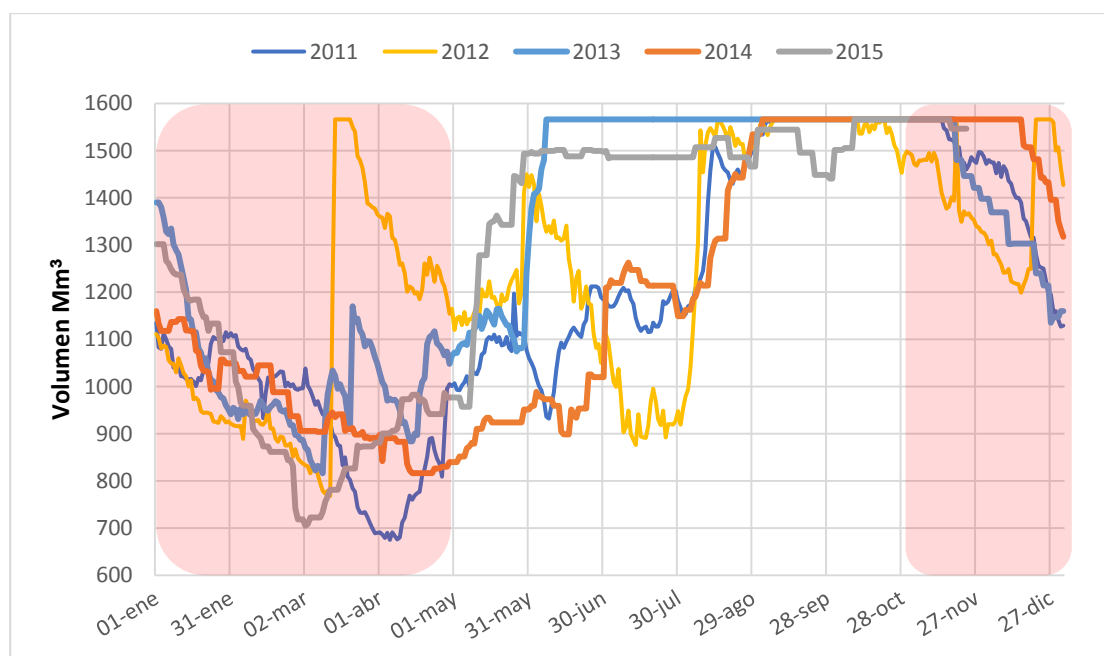
hacen los ríos Leñadura y Tres Brazos, y en casos extremos, con el aporte adicional que se puede hacer a este subsistema desde el lago Parrillar.

De acuerdo al actual criterio de operación, en los meses de verano se potencia el uso del sistema Leñadura, y se limita el uso del embalse Lynch, de manera de asegurar su disponibilidad en caso de disminuir la oferta del resto de los sistemas o producto de un aumento de la demanda. Aun cuando este funcionamiento implica mayores costos de energía, se adopta este criterio para evitar, en lo posible, el uso de la fuente del lago Parrillar, por sus dificultades operacionales y por el alto costo asociado a su funcionamiento.

4.2.1 Variación del volumen del embalse Lynch

Gracias al registro que posee la Empresa, acerca de la variación del volumen del embalse, se presenta en el gráfico siguiente, el comportamiento de los años 2011 hasta el 2015, y se puede observar que entre los meses de septiembre y octubre el embalse alcanzó su máxima capacidad de 1.518.440 [m³], e incluso en el año 2013, hay registros que desde junio ya se encontraba lleno.

Gráfico 4.1: Variación del volumen del embalse Lynch



Fuente: Aguas Magallanes S.A.

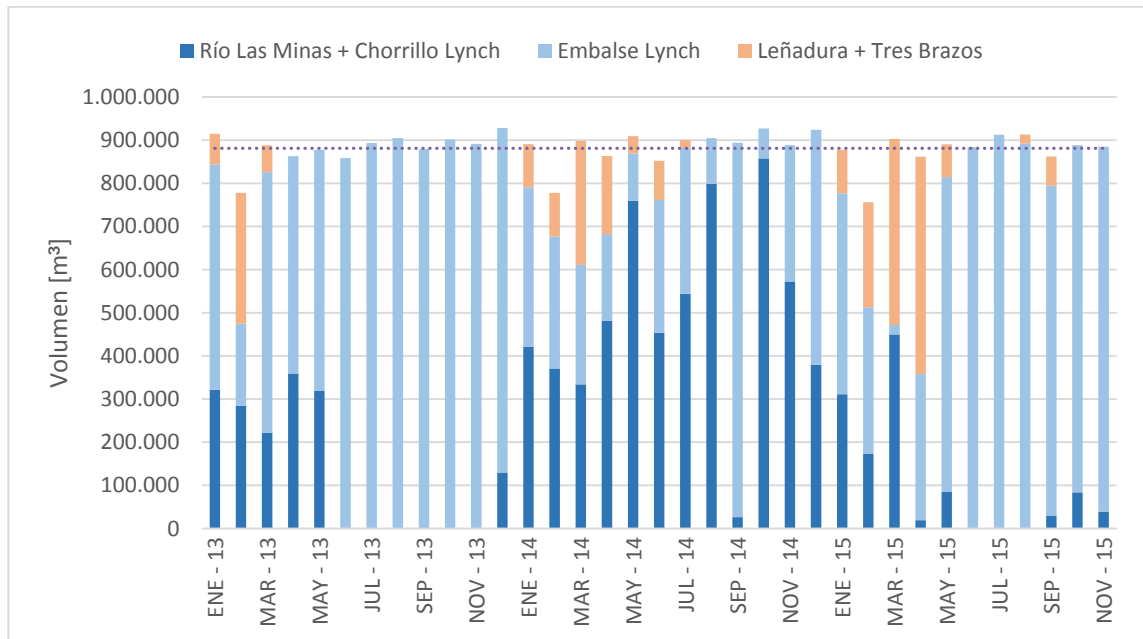
También se puede apreciar que entre los meses de octubre y noviembre, el volumen comienza a disminuir hasta los 800.000 [m³] y en algunos años bordeando los 700.000 [m³] en los meses de marzo y abril.

Finalmente, se puede observar que durante octubre hasta mayo, presenta variaciones que escapan de una tendencia a la baja, y dan cuenta que en ocasiones, no se utilizó en todo momento el agua del embalse, limitando su uso en pleno verano, lo que produjo un aumento en su volumen y una disminución en la oferta del sistema gravitacional.

4.2.2 Volúmenes que ingresan a la PTAP

La Empresa ha facilitado el registro de los volúmenes que llegan a la planta de tratamiento desde año 2013 y hasta fines del 2015. Estos volúmenes son presentados en el Gráfico 4.2 separado por grupos de fuentes, dependiendo de la ubicación y forma de llegar a la planta.

Gráfico 4.2: Aporte de las captaciones



Fuente: Aguas Magallanes S.A.

De estos registros se puede notar (en naranja) que a partir de enero hasta aproximadamente el mes de mayo utilizan la PEAP Leñadura, incluso en el año 2014 se utilizó hasta julio, y en el 2015, se llegó a utilizar en los meses de julio y agosto. Asimismo, se puede notar que hay periodos que sólo utilizan el embalse Lynch y en otros, se utiliza en mayor medida el aporte del río Las Minas.

4.2.3 Costos de la PEAP

Al igual que los registros anteriores, la Empresa ha dispuesto de los costos asociados al funcionamiento de la PEAP Leñadura, y con ellos se calcula el costo medio de elevación por metro cúbico, en base a los datos operaciones correspondientes al periodo enero de 2014 hasta agosto de 2015, estos datos son presentados en la Tabla 4.1.

El costo de elevar un metro cúbico desde la PEAP Leñadura a la planta de tratamiento de la ciudad, se calcula como el cociente entre el costo de la energía consumida y el volumen aportado desde las captaciones. El valor promedio alcanzado en este periodo analizado alcanza a \$29/m³

Asimismo, el costo de elevar un metro cúbico desde la PEAP Parrillar al estanque de acumulación y aspiración de la PEAP Leñadura, la Empresa estima que es de \$150/m³ debido a que su funcionamiento es con diésel.

Tabla 4.1: Energía eléctrica PEAP Leñadura

Mes	Energía kWh	Costo \$	Leñadura + Tres Brazos m ³	\$/kWh	\$/m ³
ENE-14	33.024	1.978.655	100.200	59,92	19,75
FEB-14	40.320	2.254.412	101.160	49,07	22,29
MAR-14	104.640	5.204.118	287.280	18,91	18,12
ABR-14	77.760	4.073.319	180.720	25,45	22,54
MAY-14	21.120	1.490.613	39.960	93,69	37,30
JUN-14	34.560	2.875.571	90.720	57,25	31,70
JUL-14	11.520	1.048.824	17.280	171,76	60,70
AGO-14	1.920	530.294	0	1.030,55	-
SEP-14	2.880	516.050	0	687,03	-
OCT-14	1.920	863.361	0	1.030,55	-
NOV-14	1.920	877.521	0	1.030,55	-
DIC-14	1.920	882.185	0	1.030,55	-
ENE-15	31.680	2.594.622	100.796	62,46	25,74
FEB-15	83.520	5.206.891	243.716	23,69	21,36
MAR-15	149.760	8.835.924	431.280	13,21	20,49
ABR-15	201.600	11.365.042	503.998	9,81	22,55
MAY-15	46.080	2.943.235	76.320	42,94	38,56
JUN-15	2.880	610.630	0	687,03	-
JUL-15	2.880	514.454	0	687,03	-
AGO-15	7.680	758.824	21.000	257,64	36,13

Fuente: Aguas Magallanes S.A.

Considerando el valor promedio de elevación de la PEAP Leñadura y los volúmenes aportados del río Tres Brazos y Leñadura presentados en la anterior sección, se puede decir que para los periodos de noviembre hasta abril de los años 2013 – 2014 y 2014 –

2015 se tiene un costo por el uso de la planta elevadora de \$19.424.827 y \$37.139.506 respectivamente.

Tabla 4.2: Volumen y costo de elevación PEAP Leñadura

	Volumen [m ³]	Costo [\$]
NOV13 - ABR14	669.360	\$ 19.424.827
NOV14 - ABR15	1.279.790	\$ 37.139.506

Fuente: Aguas Magallanes S.A.

Entre un año y otro, la variabilidad que se presenta tanto en los volúmenes aportados por el sistema gravitacional como el aporte que hacen las fuentes del sistema de impulsión, dan cuenta que no existen un patrón definido de operación, sin duda por la misma disponibilidad de las fuentes pero también por la falta de una consigna de uso del embalse dejando el funcionamiento quede a criterio del operador y no se utilice eficientemente el volumen almacenado.

Puesto que no se tiene un modelo que permita representar lo que genera la regulación del embalse Lynch en el sistema, la situación actual de funcionamiento resulta muy conservador para el periodo de estiaje, y de alto costo.

El modelo a diseñar flexibiliza la restricción impuesta en la actual operación y evalúa los costos de un mayor uso de esta fuente, bajo distintas condiciones de recarga, buscando hacer más eficiente la utilización de sus aguas.

4.3 RESTRICCIONES Y PRIORIDADES DEL SISTEMA

El actual criterio de operación del embalse Lynch se puede mejorar administrando de mejor forma el volumen almacenado, y también aprovechando la recarga natural que posee durante todo el año, de manera que se disminuya el uso de la planta elevadora Leñadura durante los meses de verano.

A partir de los antecedentes del capítulo anterior, acerca de la ocurrencia de los deshielos y el comienzo del año hidrológico, y de acuerdo a los registros de la variación del nivel del embalse que entregó la Empresa, se establece que el embalse se encuentra en su máxima capacidad a partir del 1º de Noviembre y se fija una cota mínima operacional al término del mes de Abril. De este modo el embalse aporta con sus aguas al chorrillo Lynch para que sean conducidas junto con las aguas captadas del río Las Minas hacia la planta de tratamiento de la ciudad. Con esto se garantiza que, al menos,

se va utilizar todo el volumen útil del embalse, y existiría un ahorro al disminuir los volúmenes de elevación al no retener las aguas.

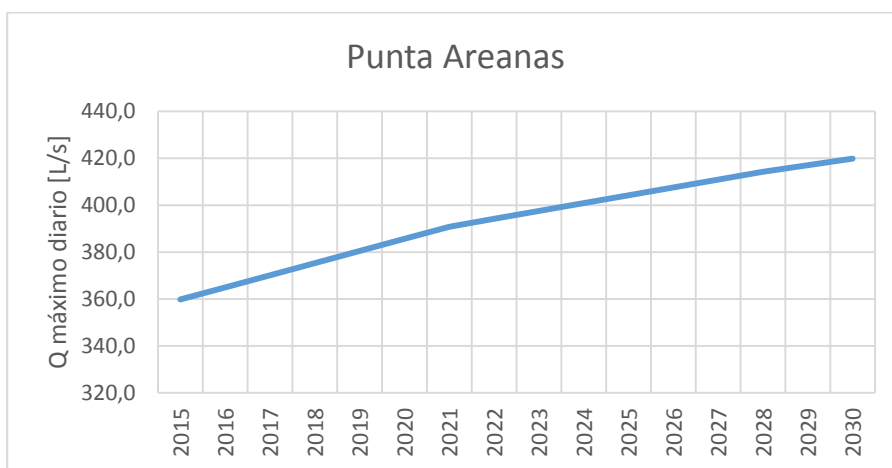
En caso que, aun cuando se utilice el embalse y no se logre satisfacer la demanda, habrá que utilizar el sistema de impulsión Leñadura, por lo cual, se debe tener en cuenta la disponibilidad en los ríos Leñadura y Tres Brazos. Si aun así, no se logra suplir la demanda de la ciudad se tendrá el respaldo el lago Parrillar.

4.3.1 Demanda de la ciudad

Para simular la operación y poder identificar cuándo se necesita el aporte de las fuentes del sistema de impulsión, se compara la oferta del sistema gravitacional con la demanda mensual de agua potable de la ciudad de Punta Arenas.

En el siguiente gráfico se puede observar la proyección de demanda de la localidad de Punta Arenas hacia el año 2030, presentándose un crecimiento anual en torno al 1,4% hasta el año 2021 y luego decae su crecimiento a una tasa del 0,8%.

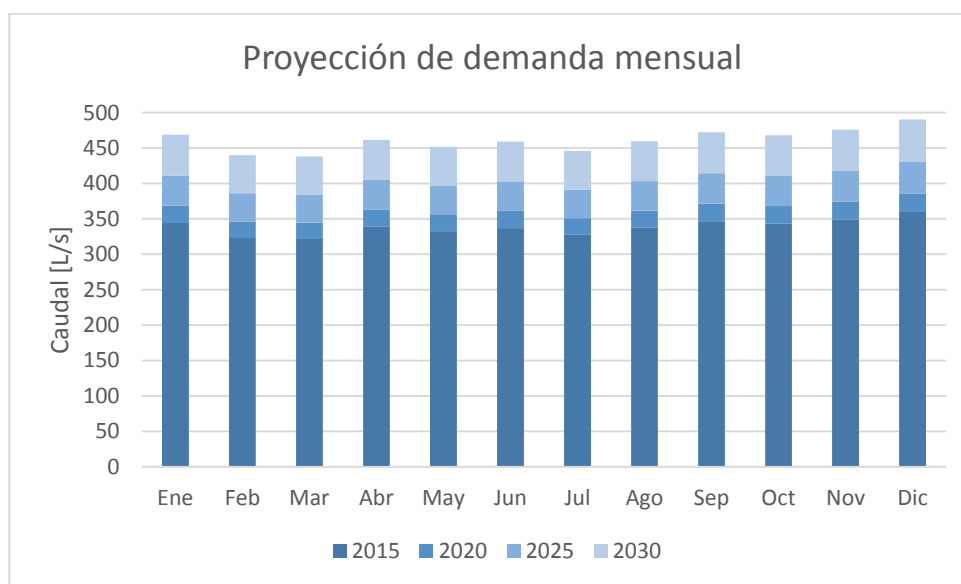
Gráfico 4.3: Proyección de demanda [L/s]



Fuente: Plan Maestro - Aguas Magallanes S.A.

De forma similar se presenta la demanda a escala mensual en el Gráfico 4.4 y su evolución con los años. Del gráfico se puede decir que la demanda se mantiene relativamente constante durante todo el año sin acentuarse en ninguna época del año en particular y como promedio se tiene los valores de 338,8, 385,7, 404,2 y 419,9 [L/s] para los años 2015, 2020, 2025 y 2030 respectivamente.

Gráfico 4.4: Demanda Mensual de Agua Potable 2015 - 2030



Fuente: Plan de Maestro - Aguas Magallanes S.A.

Como la demanda no se acentúa en ninguna época en particular y considerando que después de noviembre comienza a disminuir el nivel de los ríos y esteros hasta el comienzo del año hidrológico, es imprescindible optimizar el uso de las fuentes del sistema gravitacional, en especial el embalse Lynch para mejorar la operación y reducir los costos por el uso de la planta elevadora Leñadura.

4.3.2 Aspectos técnicos del sistema

De acuerdo a lo informado por Aguas Magallanes S.A. en la Tabla 4.3 se presenta la capacidad de producción de fuentes de abastecimiento. De esta forma la oferta del caudal medio mensual de cada una de las siete cuencas que forman el sistema productivo es el generado por su propia cuenca limitado a su capacidad de producción. No se informa un valor para la cuenca del embalse Lynch, ya que no presenta una obra de captación que conduzca sus aguas a él.

Tabla 4.3: Capacidad de Producción de las Captaciones

Cuencas	Capacidad de Producción [m³/s]
LMB : Río Las Minas en bocatoma	0,500
TBC : Río Tres Brazos en captación	0,225
LDC : Río Leñadura en captación	0,150
CNB : Estero Ciervo Norte en bocatoma	0,180
CSB : Estero Ciervo Sur en bocatoma	0,070
ELY : Embalse Lynch	-
CLB : Chorrillo Lynch en bocatoma	0,380

Fuente: Plan de Desarrollo Aguas Magallanes S.A.

Para establecer de qué forma se abastece la planta de tratamiento, se consideran cuatro alternativas para satisfacer la demanda de agua potable de Punta Arenas.

- Sistema Gravitacional
 - Fuentes sin almacenamiento
 - Uso del embalse Lynch

- Sistema de Impulsión
 - Planta elevadora Leñadura
 - Planta elevadora Parrillar

Estas cuatro alternativas de abastecimiento se trabajan privilegiando las fuentes que escurren de forma gravitacional debido a su bajo costo de operación y estas son separadas en dos. La primera alternativa se agrupan las fuentes que no tienen un sistema para almacenar sus aguas, ya que son aprovechadas en todo momento, y como segunda alternativa se considera el uso del embalse Lynch haciendo uso controladamente de sus aguas almacenadas.

Luego se considera el uso de las fuentes que requieren elevación. También se separan en dos, siendo la tercera alternativa de abastecimiento realizado por la planta elevadora Leñadura y en último lugar se considera el uso de la planta elevadora Parrillar. Se realiza de esta forma debido a la cercanía y al costo de operación que tiene cada planta.

Como se verá más adelante, el criterio aplicado para la construcción del modelo busca, en primer lugar, evitar o minimizar el uso del lago Parrillar, y en segundo lugar, maximizar el uso de las fuentes gravitacionales.

Se describe a continuación, con mayor detalle, las fórmulas que rigen la oferta del modelo en cada fuente.

4.3.2.1 Sistema gravitacional

- Fuentes sin almacenamiento

La primera alternativa de abastecimiento considera que la planta de tratamiento sólo utiliza las aguas del río Las Minas (Q_{LM}) y lo que genera la escorrentía de la cuenca chorrillo Lynch, entre el embalse y la captación Lynch (Q_{CLB}). La oferta de estas dos fuentes se representa en la ecuación N°4.1. La ecuación N°4.2 establece que el caudal captado por la bocatoma Las Minas, viene siendo lo generado por su propia cuenca limitado a su capacidad de producción de 0,500 [m³/s] y la ecuación N°4.3 indica que

captación Lynch entrega lo generado por la cuenca del chorrillo Lynch limitado a la capacidad de producción de la bocatoma siendo ésta de 0,380 [m³/s]. Cabe mencionar que esta captación recoge también el agua que es entregada por el embalse al chorrillo en cuestión.

$$Oferta_1 = Q_{LM} + Q_{EM1} \quad (4.1)$$

$$Q_{LM} = Q_{LMB} \leq 0,500 \quad (4.2)$$

$$Q_{EM1} = Q_{CLB} \leq 0,380 \quad (4.3)$$

- Uso del embalse

En los meses cuando la primera alternativa no puede suplir la demanda, se considera el uso del embalse Lynch para complementar la oferta. Se liberan sus aguas controladamente hacia el chorrillo homónimo (Q_{Salida}), de esta forma la captación Lynch se compone de lo generado por su propia cuenca más el caudal liberado desde el embalse, limitado a la capacidad de producción de la bocatoma de 0,380 [m³/s].

Se conoce la infiltración que existe en el chorrillo Lynch, donde el transporte de las aguas del embalse se realiza por un cauce natural. Mediciones que ha realizado Aguas Magallanes S.A. dan cuenta que se genera una pérdida cercana al 20% del caudal liberado del embalse (Q_{Salida}) al llegar a la captación Lynch, sin considerar los aportes de la cuenca. Esto queda representado en la ecuación N°4.5 por consiguiente la segunda alternativa de abastecimiento queda de la siguiente manera.

$$Oferta_2 = Q_{LM} + Q_{EM2} \quad (4.4)$$

$$Q_{EM2} = Q_{CLB} + 80\%Q_{Salida} \leq 0,380 \quad (4.5)$$

Cuando la captación Lynch se encuentre en su máxima capacidad, las aguas que rebasan la barrera, son descargadas al río Las Minas.

4.3.2.2 Uso del sistema de impulsión

- Planta elevadora Leñadura

En caso que no se pueda satisfacer la demanda con las fuentes del sistema gravitacional, la tercera alternativa de abastecimiento utiliza la planta elevadora Leñadura.

La ecuación N°4.6 representa la nueva oferta del sistema. La ecuación N°4.7 representa las fuentes que son parte de este sistema de impulsión, los ríos Leñadura (Q_{LD}) y Tres

Brazos (Q_{TB}), cuya capacidad real está limitada a 0,358 [m³/s] que viene siendo la capacidad de la planta elevadora Leñadura (Q_{PLD}). La ecuación N°4.8 y N°4.9 establecen que el caudal captado es igual al generado por su propia cuenca, Leñadura (Q_{LDC}) y Tres Brazos (Q_{TBC}), limitado a su capacidad de las captaciones, de 0,150 [m³/s] y 0,225 [m³/s] respectivamente.

$$Oferta_3 = Q_{LM} + Q_{EM2} + Q_{PLD} \quad (4.6)$$

$$Q_{PLD} = Q_{LD} + Q_{TB} \leq 0,358 \quad (4.7)$$

$$Q_{LD} = Q_{LDC} \leq 0,150 \quad (4.8)$$

$$Q_{TB} = Q_{TBC} \leq 0,225 \quad (4.9)$$

- Planta elevadora Parrillar

La última alternativa de abastecimiento, aumenta la oferta de la planta elevadora Leñadura utilizando las aguas del lago Parrillar (Q_{PLP}), sin embargo, se ve limitada por la capacidad de la planta elevadora del mismo nombre y es representado por la ecuación N°4.10.

$$Q_{PLD} = Q_{LD} + Q_{TB} + Q_{PLP} \leq 0,358 \quad (4.10)$$

Si bien se puede extraer agua del lago Parrillar durante todo el año, gracias a su gran capacidad de almacenamiento, lo que la hace una fuente prácticamente ilimitada, el caudal efectivo de suministro de esta fuente se encuentra restringido por la capacidad de la planta elevadora ubicada en la captación, que es de 0,200 [m³/s].

En la operación, además, debe considerarse que la planta elevadora Parrillar se encuentra a más de 45 [km] de Punta Arenas y funciona con diésel, ya que el lugar donde se emplaza no cuenta con energía eléctrica. Lo anterior, sumado a su vulnerabilidad y a su alto costo de operación, hace que esta fuente sólo se utilice cuando la oferta del resto de las alternativas no permita cumplir la demanda o en caso de emergencia. De hecho, en la práctica, desde su construcción, en el año 2004, su uso ha sido muy puntual, y sólo como ejercicio.

Con las alternativas y el criterio general de abastecimiento descritos, la principal variable de operación del sistema resulta ser el caudal liberado del embalse (Q_{Salida}) al chorrillo Lynch, y, consecuentemente, la operación de la planta elevadora Leñadura, que se debe realizar para complementar el caudal demandado.

En este contexto, se ha desarrollado un modelo para simular a escala mensual la operación del embalse y así conocer su disponibilidad de agua en el tiempo. Para este efecto, se impone restricciones al volumen que se puede liberar, a partir de distintos

escenarios, de manera de asegurar el continuo abastecimiento de agua a la planta de tratamiento de la forma más eficiente posible.

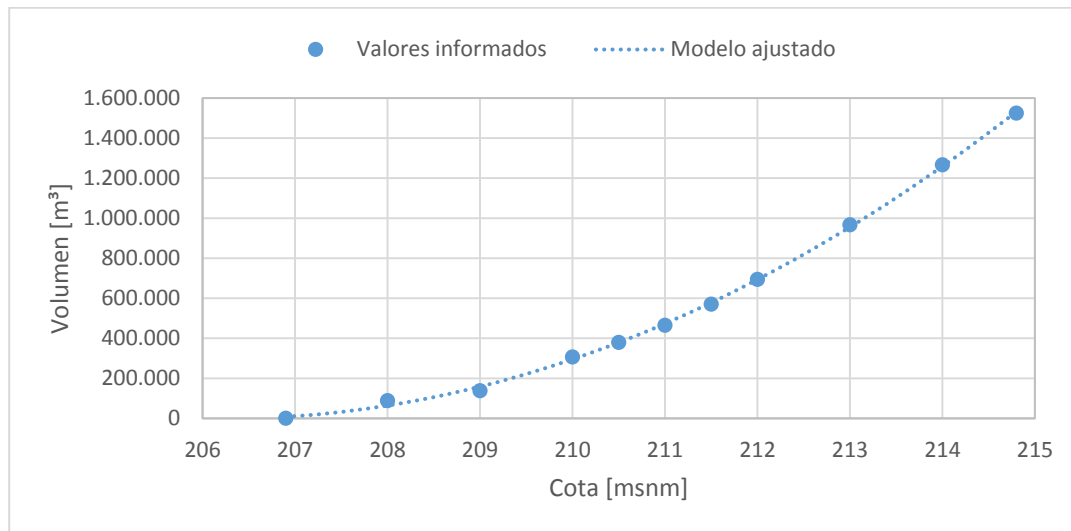
4.4 FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE

Se revisa en esta sección los aspectos que se deben considerar para definir cuáles son las descargas del embalse al chorrillo Lynch, que optimizan el funcionamiento del sistema en distintos escenarios.

4.4.1 Curva de Capacidad

Para determinar la variación del volumen almacenado mes a mes, se utiliza la curva de capacidad del embalse, entregada por Aguas Magallanes S.A., la que se presenta en el Gráfico 4.5 siguiente.

Gráfico 4.5: Curva de Capacidad del Embalse Lynch



Fuente: Aguas Magallanes S.A.

La información de la curva de capacidad del embalse, se ajusta a la ecuación N°4.11 que describe el volumen de agua almacenada en [m³] identificado por la variable “V” en función de la altura “Z” en [msnm].

A partir de esta ecuación, se deriva para obtener la curva hipsométrica que relaciona la superficie con respecto a la cota. La variable “S” de la ecuación N°4.12 representa el

área del espejo de agua del embalse en [m²] en función de la altura “Z”, también en [msnm].

$$V = 4856 + 29.193,02 (Z - 206,9) + 20.556,95 (Z - 206,9)^2 \quad (4.11)$$

$$S = 29.193,02 + 41.113,9 (Z - 206,9) \quad (4.12)$$

Con la información de la curva del embalse se determina su capacidad máxima de almacenamiento (V_{MAX}), que alcanza a 1.518.440 [m³] cuando la cota del pelo de agua llega a 214,8 [msnm]. Cuando se supera este nivel las aguas que rebosan pasan sobre las presas auxiliares y son devueltas al río Los Ciervos para ser conducidas al mar. Por otra parte la información entregada indica que el fondo se ubica a cota 206,9 [msnm], por consiguiente la altura del embalse resulta de 7,9 [m].

El nivel en que se encuentran los dos tubos de captación del embalse es a 210,8 [msnm] por lo tanto el volumen de regulación utilizable es de 1.087.060 [m³].

4.4.2 Balance Hídrico

La variación en el tiempo del volumen almacenado del embalse no depende exclusivamente de la demanda y la oferta que puedan hacer los esteros que lo recargan, sino que también se ve afectado por otras variables como la precipitación, evaporación e infiltración, estas variables se presentan esquemáticamente en la Figura 4.1.

Esta variación es representada por el caudal de entrada ($Q_{Entrada}$), que corresponde a la suma del caudal afluente de la propia cuenca del embalse (Q_{ELY}), más los caudales derivados de los trasvases de los esteros Ciervo Norte (Q_{CN}) y Ciervo Sur (Q_{CS}), y más la precipitación neta sobre el espejo de agua del embalse (P). A estos aportes se le debe restar el caudal descargado al chorrillo Lynch (Q_{Salida}), los eventuales rebases (R), la infiltración (I) y la evaporación directa del espejo de agua (E).

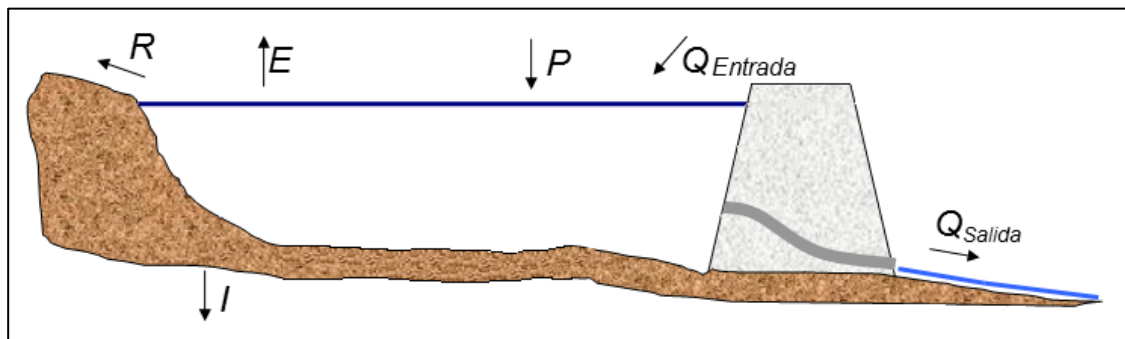


Figura 4.1: Balance Hídrico del Embalse Lynch

Fuente: Elaboración propia

La variación del volumen del embalse en el tiempo queda representada en la ecuación siguiente:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_{ELY} + Q_{CN} + Q_{CS} + P - E - I - Q_{salida} - R \quad (4.13)$$

El caudal afluente de la cuenca del embalse (Q_{ELY}), se presentó en el capítulo anterior y no presenta ninguna restricción respecto de su capacidad de captación.

Los trasvases, que corresponden a los caudales traspasados desde las cuencas de los esteros Ciervo Norte y Ciervo Sur, restringidos por la capacidad de sus captaciones, son expresados según las siguientes ecuaciones:

$$Q_{CN} = Q_{CNB} \leq 0,018 [m^3/s] \quad (4.14)$$

$$Q_{CS} = Q_{CSB} \leq 0,070 [m^3/s] \quad (4.15)$$

La precipitación efectiva (P) al igual que la evaporación directa (E) sobre el espejo de agua del embalse, se obtienen del modelo hidrológico del Sr. Fernando Harambour.

Según documentos entregados por Aguas Magallanes S.A., particularmente los anexos técnicos referentes a la memoria del estudio de la construcción del embalse, la infiltración (I) a través de la fundación y del cuerpo de la presa se estima en 0,5 [L/s].

4.4.3 Volumen de reserva

El volumen de reserva, o la cantidad de agua almacenada en el embalse Lynch disponible para suministro, se regula entre los meses de noviembre y abril, pues en abril es cuando comienza el año hidrológico y aumenta la disponibilidad de agua en las cuencas.

Se ha establecido que este volumen de reserva alcanza su máxima capacidad cuando el volumen total del embalse llega a los 1.518.440 [m³], y llega a su nivel mínimo operacional, cuando el pelo de agua se ubica a 4,1 [m] por encima del fondo del embalse, esto es a 211,0 [msnm], cuando el embalse llega a un volumen de 470.110 [m³], por lo tanto, de acuerdo a la curva de capacidad, se tiene un volumen útil de 1.048.330 [m³].

Para efectos de modelación, se considera trabajar con el mismo nivel mínimo operacional, sin importar la condición del año que se presente, ya sea un año húmedo o seco, ya que bajo éste, no se asegura que el embalse se recargue lo suficiente para alcanzar su máxima capacidad al comenzar un nuevo periodo de regulación.

4.4.4 Volumen de salida

El volumen que sale por el acueducto de descarga desde el embalse hacia el chorrillo Lynch se determina por la diferencia que hay entre el volumen disponible y el volumen de reserva. Esquemáticamente el volumen de salida se presenta en la siguiente figura.

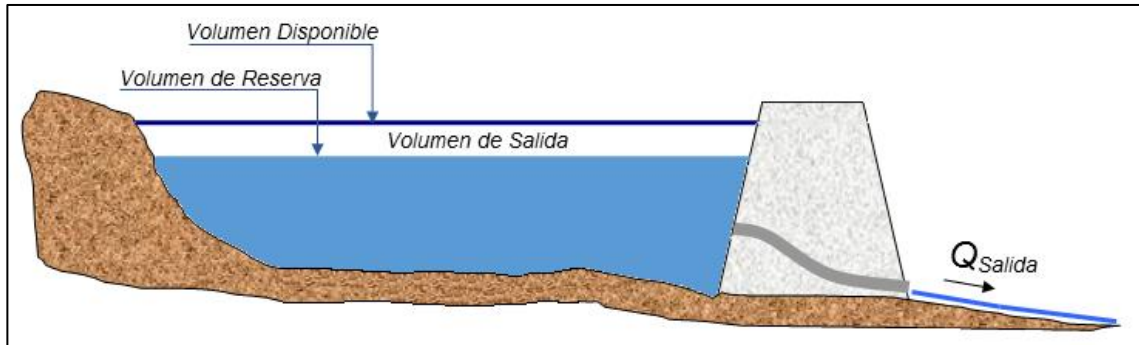


Figura 4.2: Volumen de Salida

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al volumen disponible que exista en un instante dado, la apertura de la válvula de descarga es mayor o menor de acuerdo a la disponibilidad que se tenga, para que siga la trayectoria de descenso previamente establecida.

El acueducto de descarga del embalse es de hormigón armado de 700 [mm] de diámetro con una pendiente de 0,043, tiene una capacidad máxima de porteo es de 1.918 [L/s], capacidad suficiente para descargar lo requerido por la planta de tratamiento y mucho más. Por esto, la capacidad del acueducto de descarga no es considerada para afectos de la modelación ya que no se utiliza en más de un 20% de su capacidad y no representa una limitación a la hora de determinar el volumen de salida.

4.5 PROPUESTAS DE OPERACIÓN

Considerando la disponibilidad de agua del embalse para suministro, resulta razonable evaluar un escenario “Mejorado” respecto de la operación actual, en el que las aguas del embalse se utilicen controladamente, definiendo una trayectoria de descenso del nivel de sus aguas a partir del 1º de Noviembre, con el embalse lleno, hasta el 30 de Abril, en el que se podría programar alcanzar el nivel mínimo operacional definido anteriormente. Así, se aseguraría el uso de todo el volumen útil y se evitaría elevar todo ese volumen desde la planta elevadora Leñadura hasta la planta de tratamiento, para satisfacer la demanda de la ciudad.

Sin embargo, existe también la posibilidad de considerar otro escenario en el que, basándose en un comportamiento “Acelerado” de recarga de las distintas cuencas y en la estimación de la oferta mensual del sistema productivo, se defina un uso más intenso de las aguas del embalse durante los primeros meses de su regulación (normalmente entre Noviembre hasta fines de Enero), suponiendo una recarga y disponibilidad de agua en las distintas fuentes que permita suplir la demanda hasta Abril, sin bajar del límite inferior de agua en el embalse durante el verano.

En consecuencia, para analizar el sistema productivo de agua potable de la ciudad de Punta Arenas y evaluar el ahorro que signifique optimizar el sistema, se consideran tres escenarios de acuerdo a la variación del volumen de reserva del embalse Lynch entre Noviembre y Abril, y que esquemáticamente son presentados en el Gráfico 4.6.

a) Escenario Actual

El escenario *Actual* simula el funcionamiento de forma conservadora, manteniendo el embalse relativamente lleno asegurando su disponibilidad en la época estival. Se aumenta el uso de la PEAP Leñadura, y si falta agua, se libera el agua del embalse para evitar que se encienda la PEAP Parrillar.

b) Escenario Mejorado

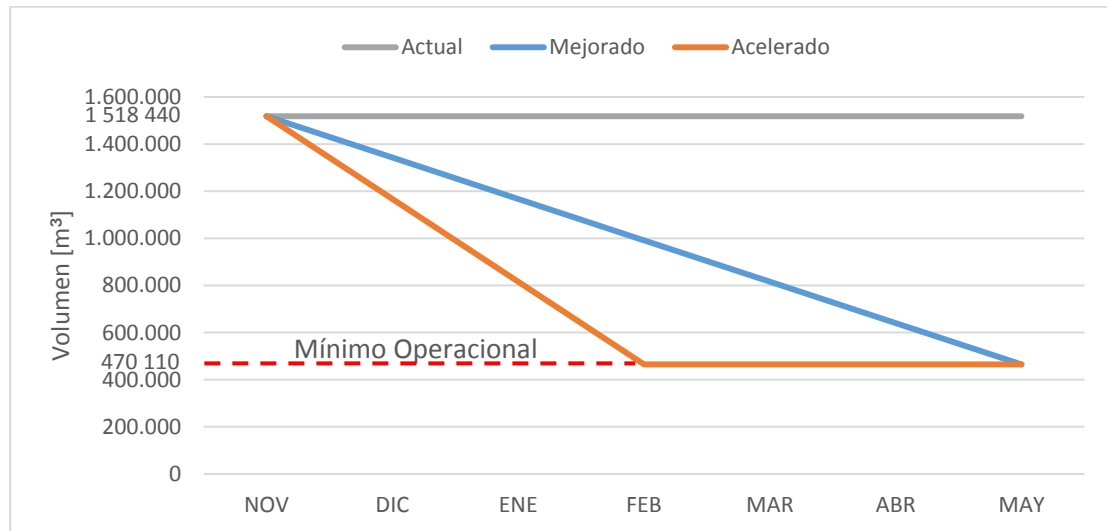
El escenario *Mejorado* utiliza el agua del embalse de manera paulatina siguiendo una trayectoria lineal en donde se parte lleno y desciende de forma gradual terminando en el nivel mínimo operacional, aprovechando sus aguas durante todo el periodo de regulación.

c) Escenario Acelerado

El escenario *Acelerado* supone que va haber una recarga en las captaciones del sistema producto de un año lluvioso, y apresura el descenso del nivel del embalse utilizando gran parte del volumen de almacenamiento en los primeros meses de regulación para disminuir el uso de la PEAP Leñadura, pero está el riesgo de agotar toda la reserva al principio y que no llueva, quedándose sin agua el resto del periodo, y con la consecuencia de tener que usar en mayor medida el sistema de impulsión Leñadura o incluso encender Parrillar,

El descenso del nivel del embalse para cada escenario, se puede representar gráficamente de la siguiente manera.

Gráfico 4.6: Escenarios de Variación del Volumen de Reserva



Como se puede ver, en el escenario *Actual*, el embalse no tiene ninguna variación, a diferencia de, un escenario *Mejorado*, el nivel del embalse disminuye gradualmente hasta llegar al mínimo a fines de Abril. Lo interesante de la propuesta, ocurre en el escenario *Acelerado*, incrementando los volúmenes descargados en los primeros meses para evitar, en lo posible, el uso del sistema de impulsión, pero a partir de Febrero, el embalse ya ha agotado todo su volumen de reserva y solamente puede liberar la recarga que llegue a él, permaneciendo en el nivel mínimo hasta terminar el periodo de regulación. Debido a esto, el ahorro que se obtenga en los primeros meses podría ser mermado producto del excesivo uso del sistema de impulsión en estos últimos meses, sobre todo, en condiciones de escasez.

Los escenarios *Mejorado* y *Acelerado*, se pueden llevar a la práctica mediante el uso de válvulas reguladoras de caudal en la descarga, cuya consigna de operación esté controlada en función de la altura del pelo de agua que sea definida en el tiempo para el embalse, a partir de sensores de presión hidrostáticos que activen actuadores en las válvulas de salida.

Esta misma operación se podría configurar incluso manualmente con consignas semanales o diarias de ajuste de estas válvulas de manera de disminuir el volumen de reserva según la trayectoria establecida de acuerdo al escenario seleccionado.

5 SIMULACIÓN OPERACIONAL DEL SISTEMA

5.1 ANTECEDENTES DE LA SIMULACIÓN

Para simular el abastecimiento de las fuentes al sistema de producción de agua potable se realiza un modelo a escala mensual que permite representar la variación del volumen almacenado en el embalse Lynch durante el año y su relación con el resto de las fuentes del sistema de producción.

Este modelo se ejecuta mediante diez pasos, los que se revisan en el presente capítulo.

5.2 SIMULACIÓN OPERACIONAL

La ecuación N°4.13 presentada en el capítulo anterior del balance hídrico representa la variación temporal del volumen del embalse.

Considerando un intervalo de tiempo (Δt) mensual, la ecuación N°5.1 permite determinar el volumen final de agua en el embalse al cabo de cada mes “ i ”.

$$V_{final_i} = V_{inicial_i} + Q_{entrada_i}\Delta t + (P_i - E_i)\bar{A}_i - I\Delta t - Q_{salida_i}\Delta t - R_i \quad (5.1)$$

Junto con el dato de agua remanente en el embalse, se puede determinar el volumen liberado al chorrillo Lynch y los eventuales rebases que se produzcan, mediante el cálculo de las respectivas diferencias.

En cada uno de los escenarios de operación, el cálculo de estos volúmenes se realiza considerando distintas probabilidades de excedencia, al igual que los datos mensuales de precipitación y evaporación sobre el espejo de agua del embalse y la tasa de infiltración que presenta la fundación y el cuerpo de la presa. Consecuentemente, la demanda a ser abastecida desde las otras cuencas que componen el sistema de producción, se construye de acuerdo a su prioridad de entrada y a la disponibilidad de agua asociada a la misma probabilidad de excedencia adoptada para el embalse.

Como se conoce la curva de capacidad del embalse, se tiene la relación entre la altura de agua, el volumen almacenado y la superficie del espejo de agua con las ecuaciones N°5.11 y N°5.12 del capítulo anterior.

En base a la información disponible solo queda por determinar el volumen disponible mes a mes para determinar el caudal que se libera (Q_{salida}) desde el embalse al chorrillo Lynch.

Se continúa de acuerdo a los siguientes pasos que describen el comportamiento del sistema de producción.

- i) Datos de entrada
- ii) Condiciones iniciales
- iii) Precipitación y evaporación al inicio del mes
- iv) Volumen de entrada
- v) Precipitación y evaporación a fin de mes
- vi) Volumen disponible
- vii) Volumen de salida y volumen final
- viii) Altura final
- ix) Déficit
- x) Uso del sistema de impulsión

5.2.1 Pasos del Modelo

- i) Datos de entrada
 - volumen de reserva (V_{Res}) :
Según figura N°5.2 “Variación del volumen de reserva”.
 - volumen máximo (V_{Max}) : 1.518.440 [m³]
Según la ecuación N°5.11 de la curva del embalse.
 - altura inicial a iterar (H_{it}) : 214,0 [m]
Valor para comenzar la búsqueda de la altura final al término de cada mes.
 - Infiltración (I) : 0,5 [L/s]
Corresponde a la infiltración del cuerpo de la presa según lo informado por Aguas Magallanes S.A en sus anexos técnicos referentes a la memoria del estudio de la construcción del embalse.

- error iteración : 0,005
Valor para que converja la iteración.
- Condición de operación : PE50%, PE80%, PE90% o PE95%
Según el escenario adoptado para el año a modelar.

ii) Condiciones iniciales

La operación comienza en el mes “*i*” de Noviembre, con el embalse lleno ($V_i = V_{MAX}$), a partir de ello, por medio de las ecuaciones 6.2 y 6.3 deducidas de la curva del embalse, se conoce la altura inicial (H_i) y la superficie inicial del espejo de agua (A_i).

$$H_i = 0,007(\sqrt{V_i + 5.508,3} + 29.562,9) \quad (5.2)$$

$$A_i = 29.193,0 + 41.113,9(H_i - 206,9) \quad (5.3)$$

iii) Precipitación y evaporación al inicio del mes

Utilizando el valor del área calculado en el paso anterior, se puede obtener el volumen asociado a la precipitación y evaporación sobre el espejo de agua del embalse según lo expresan las siguientes ecuaciones. Se debe ser consistente con las unidades, ya que se trabaja en [m³] y los valores de precipitación y evaporación están en [mm].

$$V_{P_i} = P_i A_i \quad (5.4)$$

$$V_{E_i} = E_i A_i \quad (5.5)$$

iv) Volumen de entrada

El caudal afluente al embalse ($Q_{Entrada}$), es igual a la suma del caudal medio mensual asociado a la probabilidad de excedencia, en el mes “*i*”, entregado por la bocatoma Ciervo Norte (CNB_i), Ciervo Sur (CSB_i) y el generado por la cuenca del embalse (ELY_i) en un intervalo de tiempo (Δt) mensual.

$$V_{Entrada_i} = (CNB_i + CSB_i + ELY_i)\Delta t \quad (5.6)$$

v) Precipitación y evaporación a fin de mes

Si se considera el valor de la altura a iterar (H_{it}) definida en el paso i) se conoce el valor del espejo de agua a fin de mes (A_{f_i}), y con él se repiten los pasos ii) y iii) quedando las ecuaciones siguientes:

$$A_{f_i} = 29.193,0 + 41.113,9(H_{it} - 206,9) \quad (5.7)$$

$$V_{P_{i,f}} = P_i A_{f_i} \quad (5.8)$$

$$V_{E_{i,f}} = E_i A_{f_i} \quad (5.9)$$

vi) Volumen disponible

Una primera aproximación del volumen final es considerar el volumen disponible, dado por la ecuación N°5.10 que depende del volumen inicial del mes “i”, la precipitación y la evaporación directa que se produce sobre el promedio del espejo de agua (\bar{A}_i), entre el inicio y fin de mes, el volumen de entrada y la infiltración mensual.

$$V_{disponible_i} = V_{inicial_i} + (P_i - E_i)\bar{A}_i + V_{Entrada_i} - I\Delta t \quad (5.10)$$

vii) Volumen de salida y volumen final del mes

Como se menciona en el punto 4.4.3 el volumen de reserva varía según el escenario que se establezca entre los meses de noviembre hasta abril. A partir del volumen disponible, la ecuación N°5.11 representa el volumen liberado en dichos meses, y es igual a la diferencia entre el volumen disponible y el volumen de reserva del mes “i” asociado a la probabilidad de excedencia con que se esté trabajando. Al término del mes “i”, el volumen final (V_{final_i}) es igual al volumen de reserva.

$$V_{salida_i} = V_{disponible_i} - V_{Reserva_i} \quad (5.11)$$

$$V_{final_i} = V_{Reserva_i} \quad (5.12)$$

Recordar que la captación Lynch posee una capacidad de 0,380 [m³/s] sobre este valor las aguas no son aprovechadas y son devueltas al río Las Minas.

Para el resto de los meses, entre mayo y octubre, el embalse se modela como si no se utilizara, debido a la mayor disponibilidad de las otras fuentes, y por una mayor recarga del mismo, de modo que, el volumen final del mes “i” es igual al volumen disponible del mes.

$$V_{salida_i} = 0 \quad (5.13)$$

$$V_{final_i} = V_{disponible_i} \quad (5.14)$$

En caso que el volumen final sea mayor que el volumen máximo, se producen rebases, que son expresados por la ecuación N°5.15 que representa la diferencia entre el volumen final y el volumen máximo, volumen que en vez de salir por el vertedero auxiliar, se libera por el acueducto de descarga hacia el chorrillo Lynch. En este caso, el volumen final es igual al volumen máximo.

$$R_i = V_{final_i} - V_{Max} = V_{salida_i} \quad (5.15)$$

$$V_{final_i} = V_{Max} \quad (5.16)$$

De esta forma, el modelo es aplicable entre noviembre y abril, y en el resto del año, los análisis resultan, en que el embalse se comienza a recargar o se encuentra lleno.

viii) Altura final

Con el valor del volumen final, al término de cada mes “*t*”, es posible determinar la altura final del embalse, considerando V_i y H_i como V_{f_i} y H_{f_i} respectivamente.

Luego se compran el valor de H_{it_i} con H_{f_i} utilizando una simple diferencia.

$$H_{it} - H_{final_i} = error \quad (5.17)$$

Se itera el valor de H_{it} hasta que la diferencia entre H_{it} con H_{final_i} sea igual al error que se definió en el paso i).

Al modificar el valor de H_{it} , varían los resultados obtenidos a partir del paso v), por lo que se debe iterar, actividad que se automatiza para agilizar la convergencia.

Una vez que converge la ecuación N°5.17, comienza la operación del mes siguiente “*i + 1*”, siendo el volumen inicial del mes siguiente igual al volumen final del mes que termina y lo mismo sucede con la altura a iterar.

- $V_{inicial_{i+1}} = V_{final_i}$
- $H_{it_{i+1}} = H_{final_i}$

ix) Déficit

Existe déficit cuando no se puede satisfacer la demanda con el sistema gravitacional. En estos casos, se aumenta la oferta utilizando el sistema de impulsión, primero con la planta elevadora Leñadura y luego con la planta elevadora Parrillar.

El volumen que se debe elevar viene dado por la diferencia entre la demanda de agua potable de la ciudad y la oferta del sistema gravitacional.

Para expresar este volumen, existen dos opciones de cálculo, dependiendo de si la captación Lynch de 0,380 [m³/s] se encuentra en su máxima capacidad o no, de acuerdo a las siguientes expresiones.

Se considera el 80% del volumen de salida debido a la infiltración del lecho natural del chorrillo Lynch.

- $Déficit_i = (LMB_i + ELB_i)\Delta t + 80\%V_{salida_i} - Demanda_i$
- $Déficit_i = (LMB_i + 0,380)\Delta t - Demanda_i$

x) Uso del sistema de impulsión

Todo el déficit que exista es suplido por la planta elevadora Leñadura, pero en ocasiones el aporte que hacen los ríos Tres Brazos y Leñadura no da abasto, debiendo complementarse la oferta con las aguas del lago Parrillar.

Así, se tiene las siguientes situaciones para determinar cuánto se utiliza la planta elevadora Parrillar.

$$Déficit_i < (LDC_i + TBC_i)\Delta t$$

Cuando el déficit es menor que la oferta de los ríos Leñadura y Tres Brazos para el mes "i", no será necesario utilizar la planta elevadora Parrillar.

- $V_{Parrillar} = 0$

$$Déficit_i > (LDC_i + TBC_i)\Delta t$$

Cuando el déficit es mayor que el aporte de los ríos, se aumenta la oferta considerando el uso de la planta elevadora Parrillar. El volumen a impulsar es la diferencia entre el valor del déficit y el volumen que aportan los ríos Leñadura y Tres Brazos.

- $V_{Parrillar} = Déficit_i - (LDC_i + TBC_i)\Delta t$

Para realizar la simulación del siguiente mes "i+1", como ya se encuentran definidos los datos de entrada, se repite los pasos del ii) al x).

En la figuraFigura 5.1 siguiente se resumen los pasos del modelo.

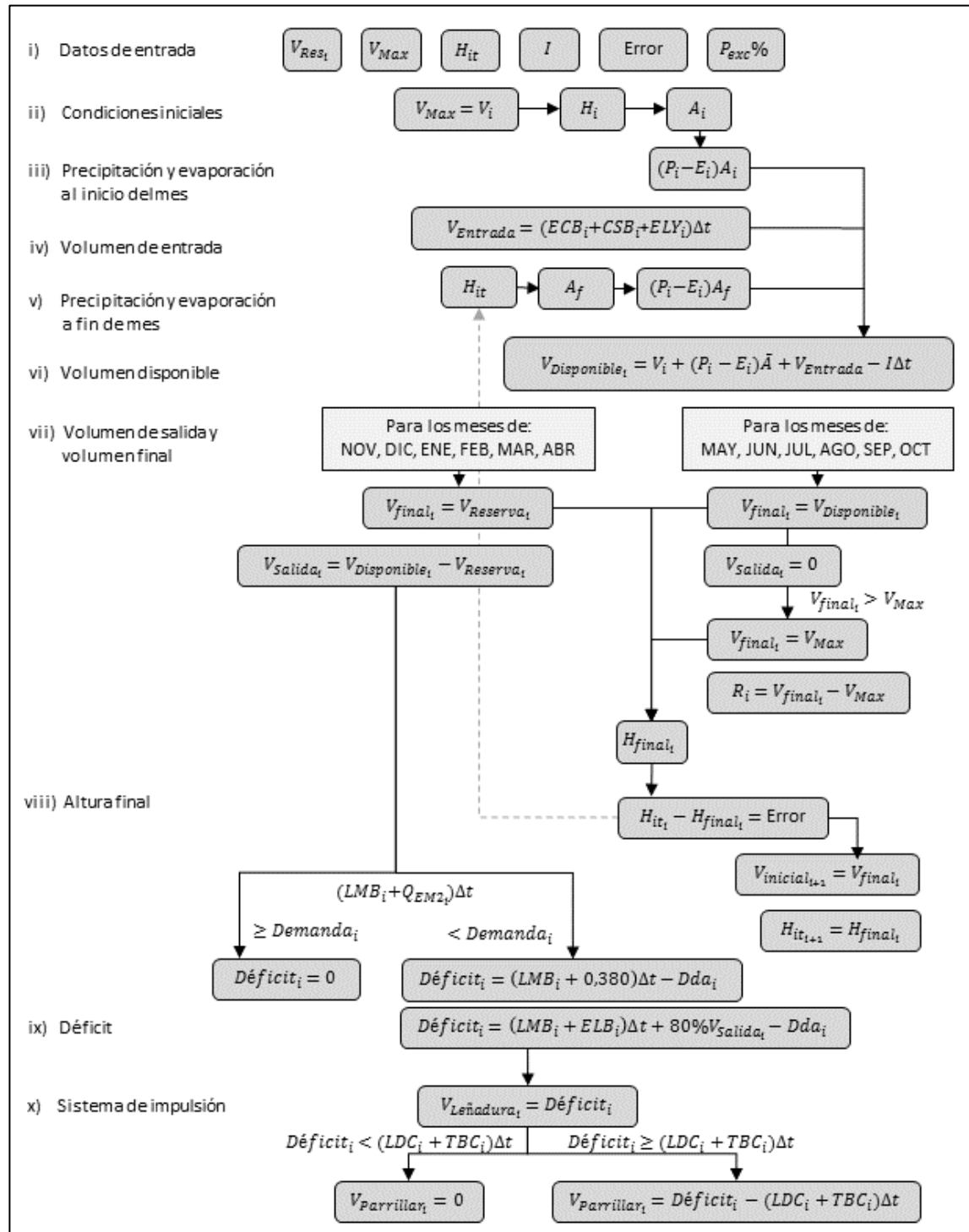


Figura 5.1: Algoritmo de Simulación

Fuente: Elaboración propia

6 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Sobre la base del modelo descrito en el capítulo anterior, se ha modelado los tres escenarios de operación del embalse, *Actual*, *Mejorado* y *Acelerado*, para los años 2015, 2020, 2025 y 2030, con distintas probabilidades de excedencia (PE), y se ha obtenido para cada caso el volumen que se libera desde el embalse y el volumen que debe ser elevado por el sistema de impulsión, tanto para la PEAP Leñadura como para la PEAP Parrillar.

En las siguientes secciones se presentan los resultados de la simulación separándolos por escenario. Éstos fueron analizados de acuerdo a la evolución de la demanda en función de las probabilidades de excedencia (PE) consideradas. Al final del capítulo se hace una comparación entre ellos.

6.1 ESCENARIO ACTUAL

6.1.1 Variación del Embalse – Escenario Actual



6.1.2 Oferta vs Demanda mensual – Escenario Actual



6.1.3 Análisis - Escenario Actual

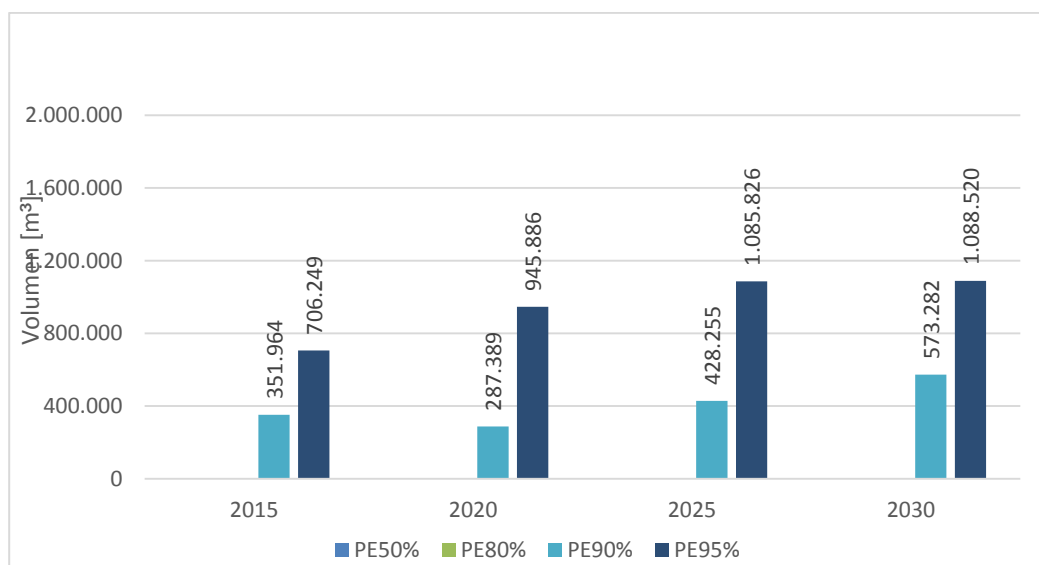
La modelación realizada para el año 2015 muestra un escenario *Actual* moderado, cuya variación del embalse se mantuvo constante para PE50% y PE80%, y en condiciones de PE90% y PE95% se liberó parte del volumen almacenado, para evitar utilizar la PEAP Parrillar.

La variación del embalse observada del año 2015, sigue el mismo comportamiento de los registros que dispuso la Empresa presentados en el punto 4.2.1: Variación del embalse Lynch, comenzando a liberar agua en el mes de noviembre, y llegado marzo, el embalse comienza a recuperar lentamente su nivel hasta alcanzar su volumen máximo en el mes de noviembre.

La variación del embalse se puede contrastar con los volúmenes mensuales presentados en los gráficos anteriores de Oferta vs Demanda. Se puede observar el aporte del río Las Minas junto con el chorrillo Lynch (LM+CH), el aporte del embalse (EMB), que para las PE50% y PE80% se presentan los eventuales reboses que se producirían. También se identifican los meses que fue necesario utilizar el sistema de impulsión a través de los ríos Leñadura y Tres Brazos (LÑ+TB), y los casos extremos, cuando se necesitaría el aporte del lago Parrillar (PR) para lograr satisfacer la demanda.

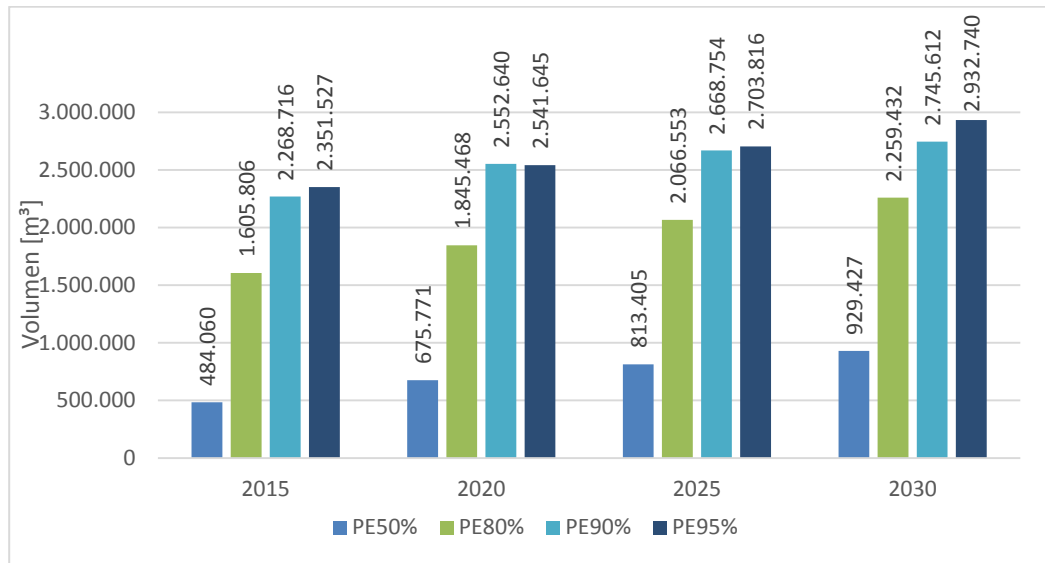
Siguiendo con lo que ocurre en los siguientes quinquenios, el embalse seguiría manteniendo su nivel para las PE50% y PE80%, y no sería necesario liberar agua. En cambio para las PE90% y PE95%, a medida que aumenta la demanda con los años, se tendría que liberar cada vez más agua para evitar el funcionamiento de la PEAP Parrillar, así como se ve en gráfico siguiente.

Gráfico 6.1: Volumen Liberado - Escenario Actual



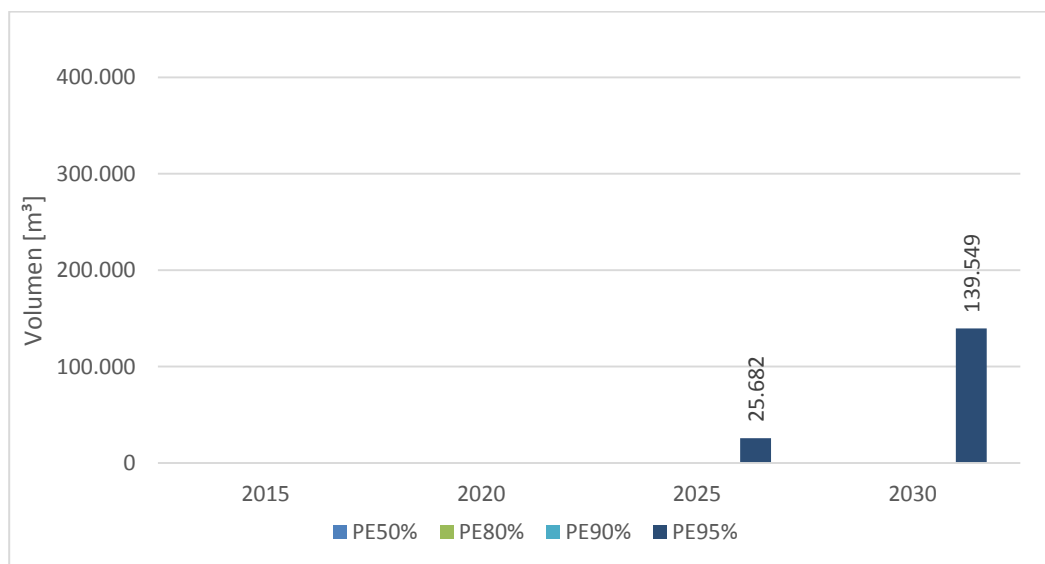
En el siguiente gráfico se presenta el volumen de elevación de la PEAP Leñadura del periodo de regulación, en función de los años y de las PE modeladas.

Gráfico 6.2: Volumen PEAP Leñadura - Escenario Actual



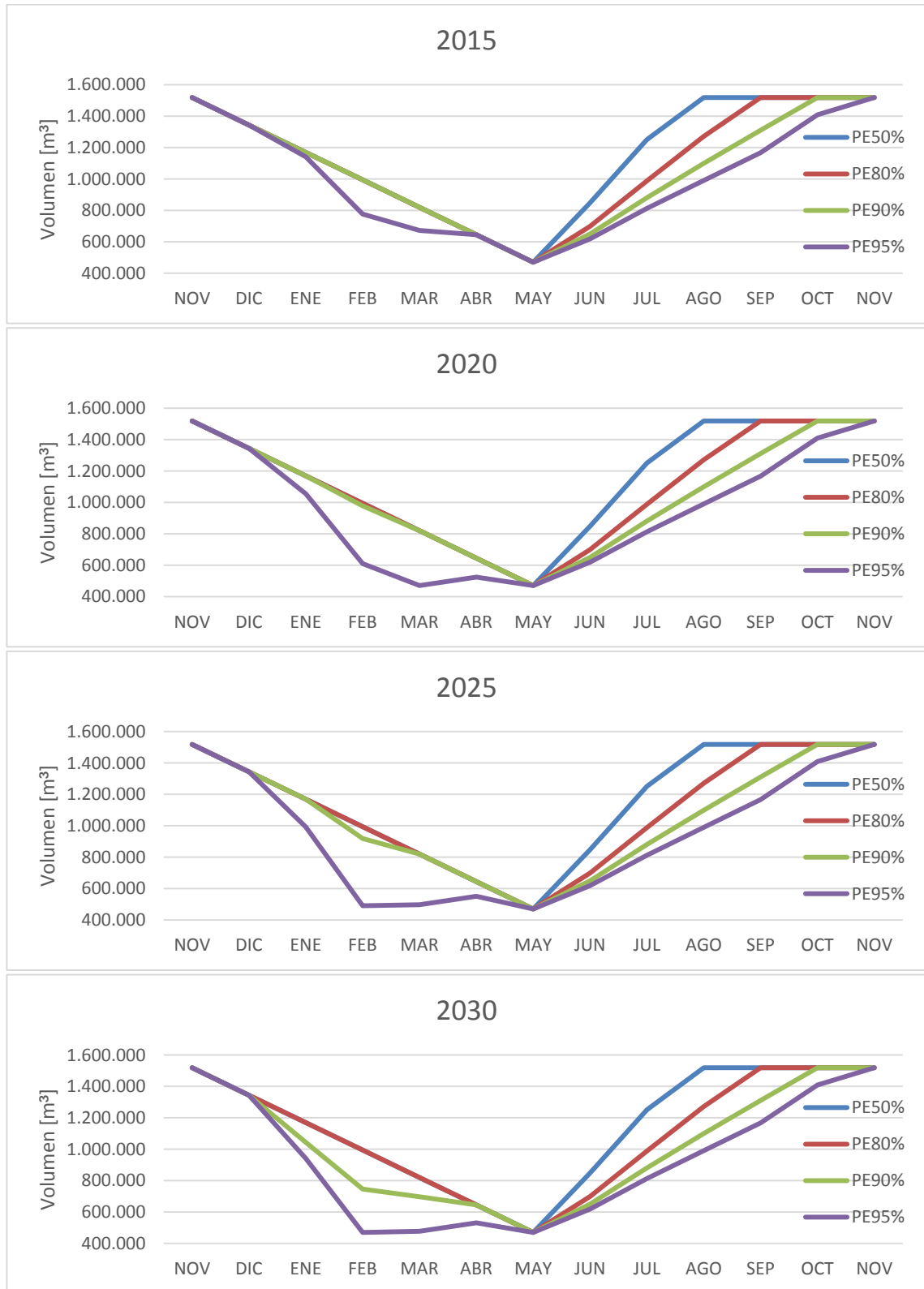
Entre los años 2025 y 2030 de acuerdo a la modelación realizada, a pesar de que se limite el uso del embalse, en condiciones de PE95% se tendría que utilizar la PEAP Parrillar.

Gráfico 6.3: Volumen PEAP Parrillar - Escenario Actual



6.2 ESCENARIO MEJORADO

6.2.1 Variación del Embalse – Escenario *Mejorado*



6.2.2 Oferta vs Demanda mensual – Escenario *Mejorado*



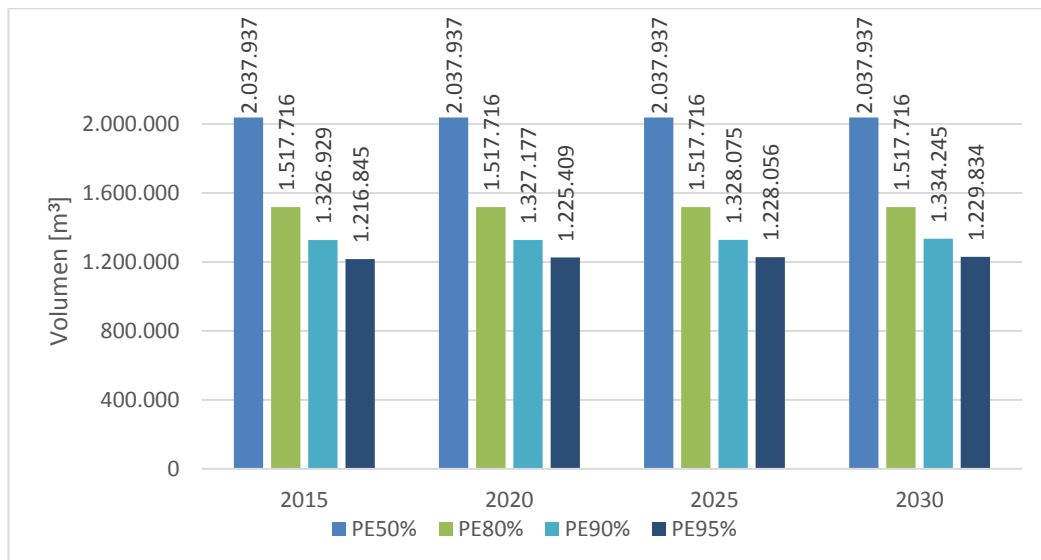
6.2.3 Análisis Escenario *Mejorado*

Se puede observar en los gráficos de variación del volumen del embalse, que el escenario *Mejorado* considera utilizar todo el volumen útil durante todo el periodo de regulación, liberando el agua de forma paulatina, aunque para condiciones de PE90% y del PE95% variaría la operación a partir de enero para evitar que se active la fuente del lago Parrillar. Este escenario permite variaciones de operación al conservar el volumen mes a mes y no apresurar su descenso.

También se puede apreciar la rapidez con que recupera su nivel, que depende de las distintas PE modeladas. La recarga continua que posee el embalse hace que consiga nuevamente el volumen máximo antes del nuevo periodo de regulación.

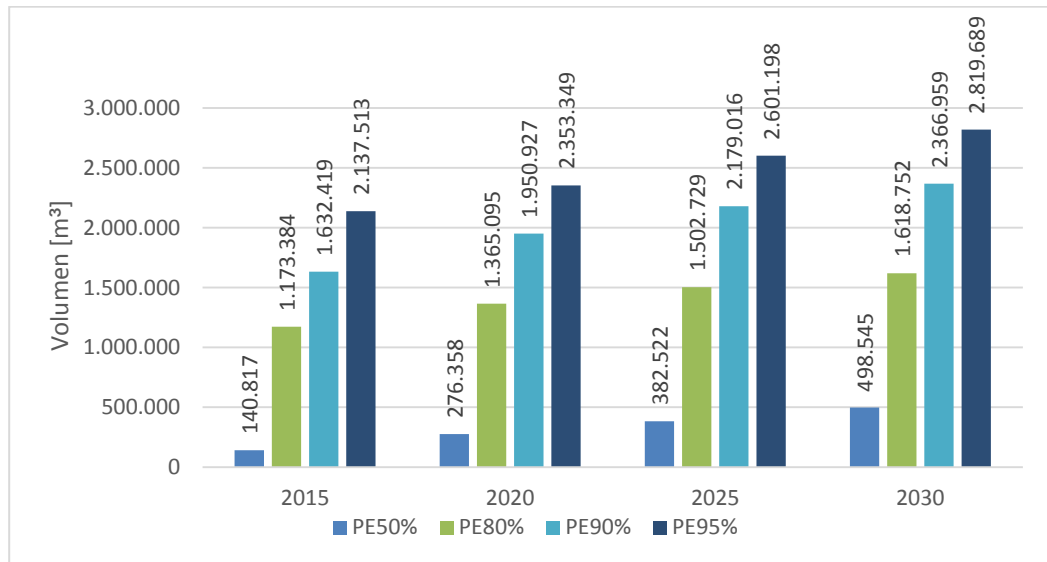
Por otro lado, en los gráficos de oferta mensual vs demanda, se puede ver que este escenario aumenta la oferta del sistema gravitacional, liberando controladamente las aguas del embalse durante todo el periodo, en vez de retenerlo como lo hace el escenario *Actual*. También se puede observar el volumen liberado durante el periodo de regulación en el siguiente gráfico.

Gráfico 6.4: Volumen Liberado - Escenario Mejorado



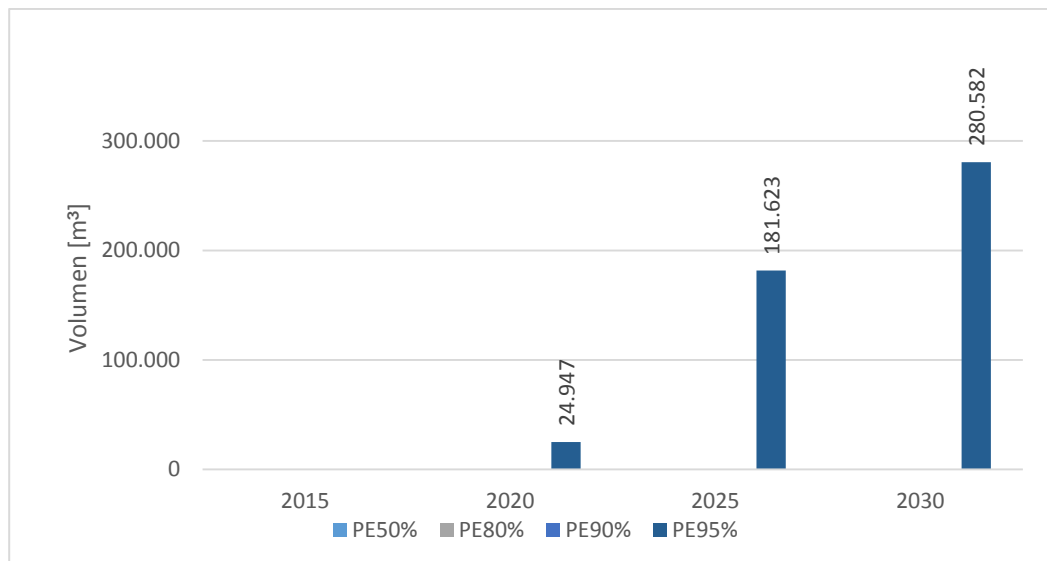
En el Gráfico 6.5 de la siguiente página, se puede observar como la operación de un escenario *Mejorado* generaría la disminución de los volúmenes de impulsión, sobre todo en condiciones de abundancia.

Gráfico 6.5: Volumen PEAP Leñadura - Escenario Mejorado



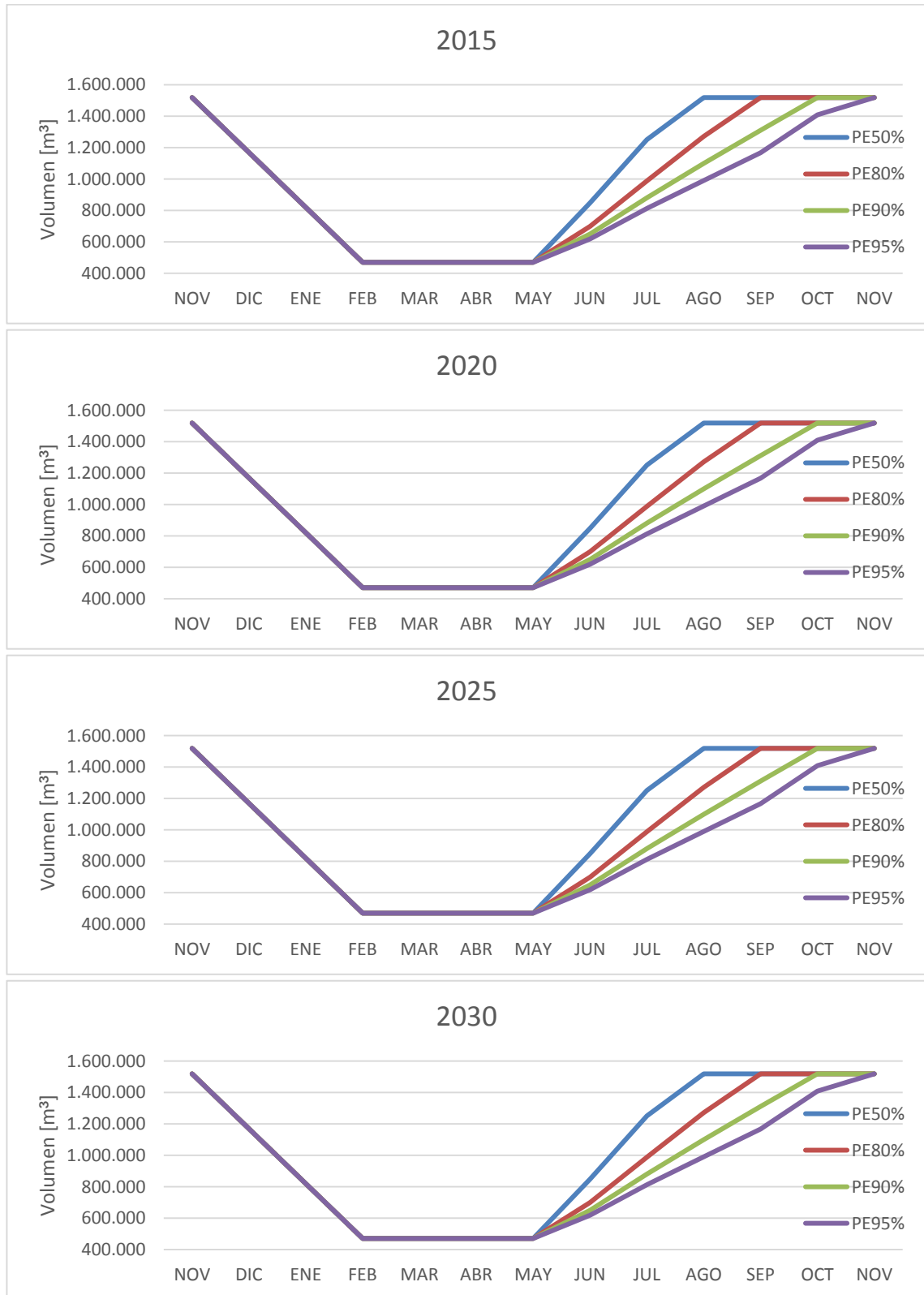
Ahora bien, en condiciones asociadas a una PE95% y por más agua que se libere para evitar que se utilice la PEAP Parrillar, se puede decir que, a partir del año 2020 se darían los primeros indicios que no sería suficiente abastecer la ciudad con las fuentes del sistema gravitacional y la PEAP Leñadura, en consecuencia, sería necesario utilizar la PEAP Parrillar.

Gráfico 6.6: Volumen PEAP Parrillar - Escenario Mejorado



6.3 ESCENARIO ACELERADO

6.3.1 Variación del embalse – Escenario Acelerado



6.3.2 Oferta vs Demanda mensual – Escenario Acelerado



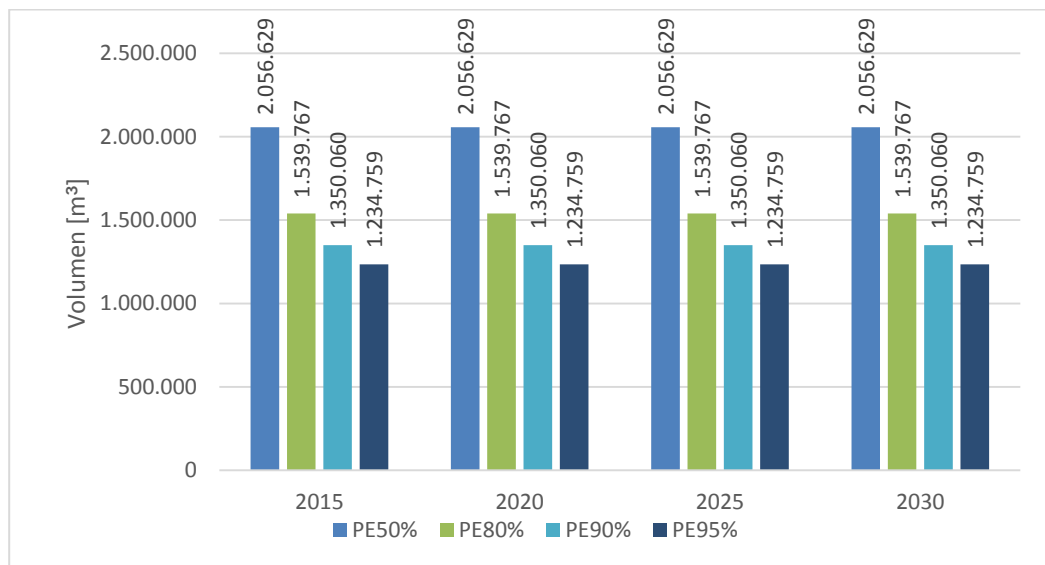
6.3.3 Análisis Escenario Acelerado

Se puede observar en los gráficos de variación del volumen del embalse, que el escenario *Acelerado*, disminuye de forma lineal, al igual que el escenario *Mejorado*, pero de forma precipitada, liberando gran parte del volumen en los primeros tres meses. Luego se mantiene en el mínimo, suministrando sólo la recarga que es genere en los meses siguientes.

También se puede apreciar que la operación de este escenario no varía en función de la demanda que aumenta con los años, y por consiguiente, el volumen liberado depende de la condición del año que se presente, ya sea un año lluvioso o seco (ver Gráfico 6.7). Lo mismo ocurre con la rapidez con que se recarga el embalse antes de iniciar el siguiente periodo de regulación.

Este escenario es poco flexible en su operación ya que agota sus reservas al comenzar febrero y no se puede liberar más agua en caso que aumente la demanda o para evitar utilizar la PEAP Parrillar.

Gráfico 6.7: Volumen Liberado - Escenario Acelerado



Analizando los gráficos mensuales se puede apreciar que al liberar gran parte de volumen en los primeros meses disminuyen los volúmenes de elevación de la PEAP Leñadura, sobre todo para PE50%, pero a partir de febrero se observa el escaso aporte del embalse lo que ocasiona un incremento en los volúmenes impulsados por la PEAP Leñadura, sobre todo para los años siguientes cuando aumenta la demanda.

Lo anterior, también se puede observar en el Gráfico 6.8, con los volúmenes totales de elevación de la PEAP Leñadura. Y se puede ver como en condiciones de abundancia se minimizan los volúmenes. En cambio en el Gráfico 6.9 se observa que en condiciones de PE95% se tendría que operar con la PEAP Parrillar.

Gráfico 6.8: Volumen PEAP Leñadura - Escenario Acelerado

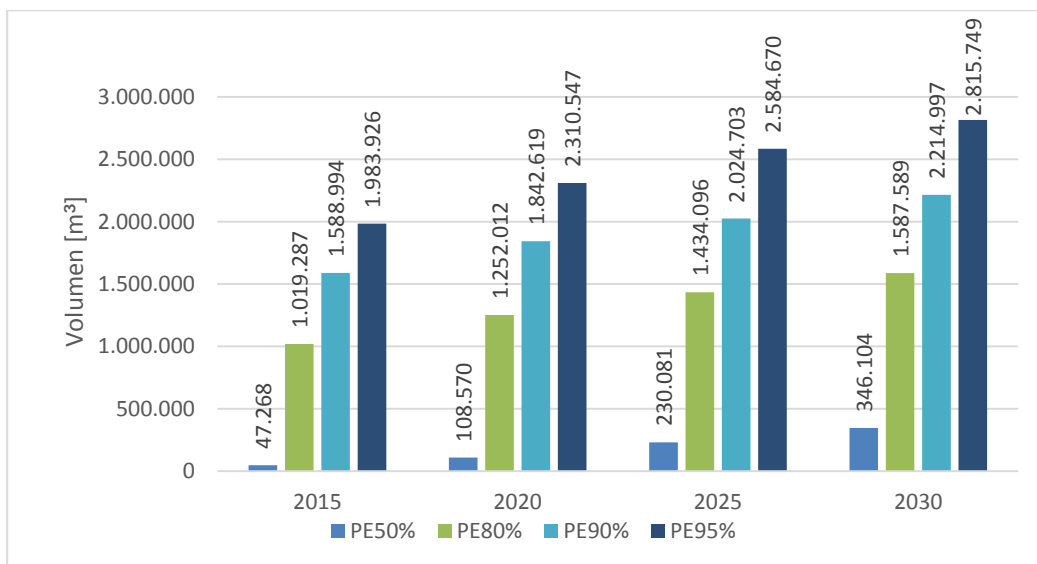
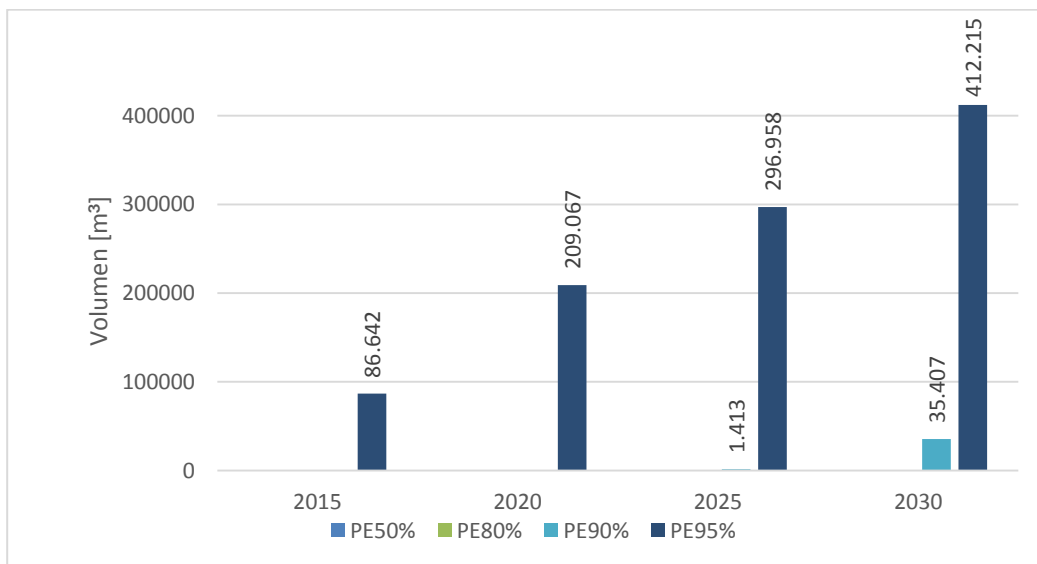


Gráfico 6.9: Volumen PEAP Parrillar - Escenario Acelerado



6.4 COMPARACIÓN DE ESCENARIOS

Sin importar el escenario modelado, *Actual*, *Mejorado* o *Acelerado*, la disponibilidad que posee el embalse, depende de la PE considerada. Al trabajar con una PE50% se tiene la mayor oferta en las cuencas del sistema y un aumento en la recarga del embalse, que se traduce en mayor disponibilidad. Por el contrario, trabajar en una condición de escasez asociada a una PE95%, redonda en que el volumen que se puede liberar, es menor, lo que aumenta los volúmenes que se deben impulsar.

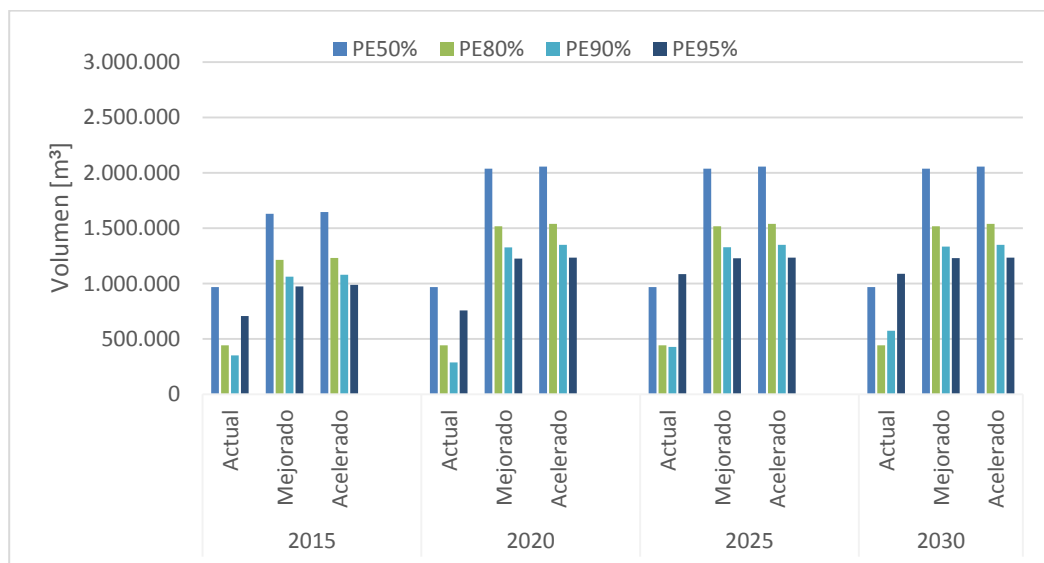
Se pudo observar en los resultados anteriores que la disponibilidad del embalse se ajusta a lo previsto en cuencas con régimen nivo – pluvial, en particular con la ocurrencia de los deshielos que ocurren en el mes de noviembre aumentando la disponibilidad del recurso pudiendo liberar más agua. A partir de ese mes, la disponibilidad comienza a disminuir lentamente hasta febrero. En abril, en tanto, comienza a aumentar nuevamente la recarga del embalse producto del inicio del año hidrológico lo que aumenta la disponibilidad del embalse recargándose para iniciar un nuevo periodo de regulación.

Tanto para el escenario *Mejorado* como para el *Acelerado*, una vez que se termina el periodo de regulación en el mes de mayo, el embalse comienza la recuperación de su nivel y dependiendo de la PE será la rapidez con que alcanza nuevamente el volumen máximo.

6.4.1 Volumen de Salida del Embalse

En el Gráfico 6.10 se compara el volumen de salida durante el periodo de regulación de los distintos escenarios modelados separándolos por año y de acuerdo a la PE modeladas

Gráfico 6.10: Comparación Escenarios - Volumen de Salida



El volumen de salida depende de la recarga que posea el embalse y del escenario de operación seleccionado, y como se puede ver en el gráfico anterior, el escenario *Actual* es el que libera la menor cantidad, sin embargo a medida que aumenta la demanda con los años, también lo hace el volumen que sale, con el fin de evitar encender la PEAP Parrillar, y se puede ver que llegado el año 2030 y PE95%, el volumen liberado sería un 11% y 12% menor que el escenario *Mejorado* y *Acelerado* respectivamente.

En cambio, los escenarios *Mejorado* y *Acelerado*, liberan prácticamente los mismo y no difieren en más un 2% ya que utilizan todo el volumen del embalse, solo que de manera diferente. Pero si se analiza los tres primeros meses, el escenario *Acelerado* puede liberar entre un 70% y 88% del volumen de salida en estos meses, en cambio el escenario *Mejorado* lo hace de forma constante durante todo el periodo de regulación.

A partir del volumen de salida del embalse de cada escenario y de acuerdo a la demanda de la ciudad, se determina el volumen que se debe elevar con el sistema de impulsión para cumplir con la demanda de la ciudad.

6.4.2 Volumen de elevación

El volumen que debe ser elevado al sistema de producción desde la PEAP Leñadura corresponderá al remanente que no puede ser abastecido de las fuentes gravitacionales, a saber: el río Las Minas, el Chorrillo Lynch y el Embalse Lynch, en cualquiera de los escenarios de operación y PE evaluados.

La capacidad de las fuentes asociadas a la PEAP Leñadura es limitada y depende de la disponibilidad de agua en la captación, la que a su vez, depende de la PE adoptada al modelar la operación.

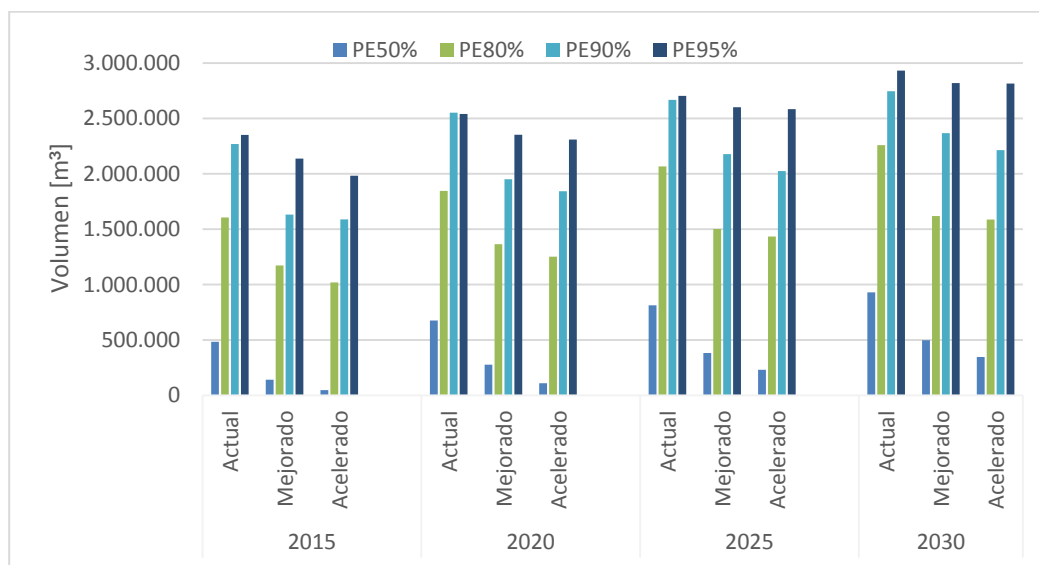
6.4.2.1 PEAP Leñadura

Al analizar los resultados de los tres escenarios, se evidencia que a medida que aumenta la escasez de agua en las fuentes, se hace necesario elevar un mayor volumen desde el sistema impulsión, debido a que el sistema gravitacional no cuenta con la suficiente oferta para satisfacer la demanda. Esto ocurre para los tres escenarios modelados.

Se registran los mayores volúmenes de elevación en el escenario *Actual*, le sigue el escenario *Mejorado* y por último el *Acelerado*. Esto ocurre para todas las probabilidades de excedencia consideradas que son presentados en el Gráfico 6.11.

Entre el escenario *Mejorado* y *Acelerado*, a medida que el recurso se hace escaso y aumenta la demanda, la diferencia tiende a ser despreciable.

Gráfico 6.11: Comparación Escenarios - Volumen PEAP Leñadura

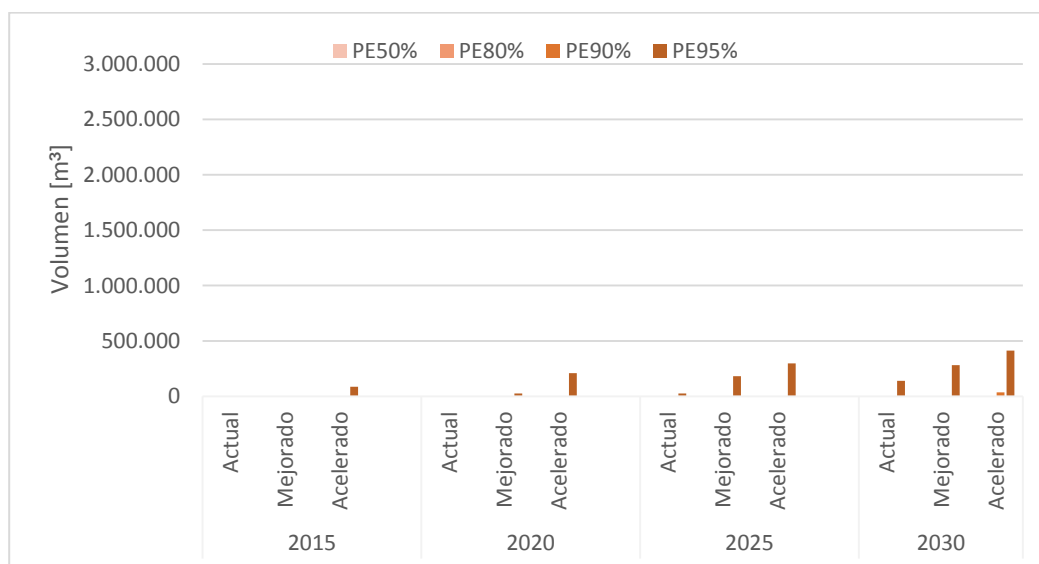


6.4.2.2 PEAP Parrillar

En los casos en los que no se pueda suplir la demanda total con la PEAP Leñadura, se debe utilizar las aguas del lago Parrillar cuya disponibilidad se ha modelado como ilimitada. En cualquier caso, por la configuración del sistema, el volumen que impulsa la PEAP Parrillar también es re-impulsado por la PEAP Leñadura.

Se puede ver en el gráfico siguiente que el escenario *Acelerado* tendría que utilizar la PEAP Parrillar desde el 2015, el escenario *Mejorado* a partir del 2020 y el escenario *Actual* en el año 2025.

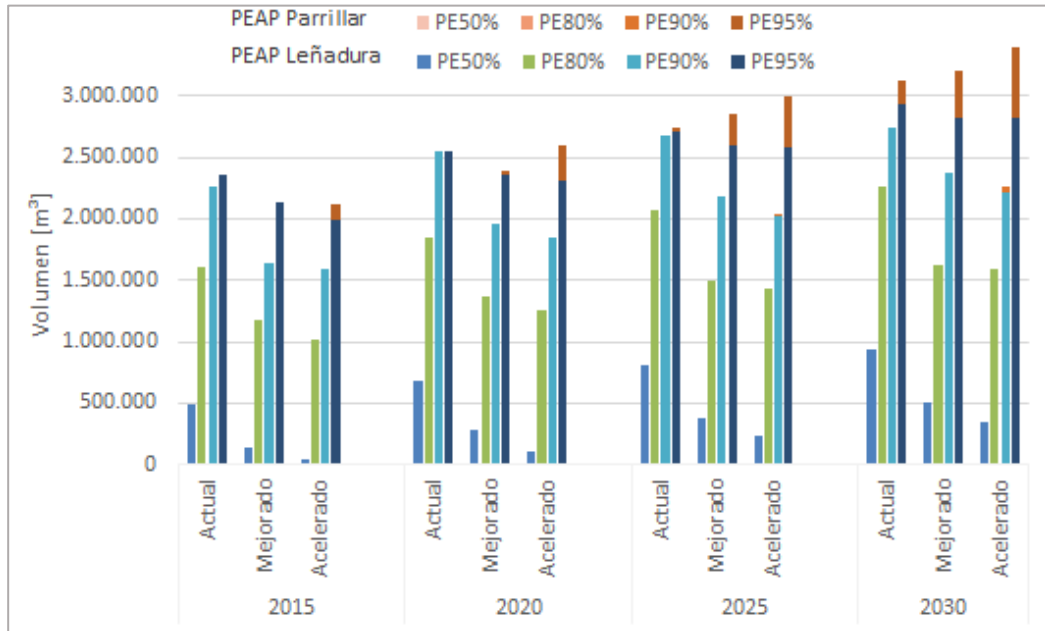
Gráfico 6.12: Comparación Escenarios - Volumen PEAP Parrillar



6.4.2.3 Volumen total de elevación

Finalmente, luego de presentar los volúmenes de elevación de las PEAP Leñadura y PEAP Parrillar, en el gráfico siguiente se comparan por año y PE los volúmenes de elevación de los tres escenarios.

Gráfico 6.13: Comparación Escenarios - Volumen Total de Elevación



En relación a estos volúmenes proyectados, el escenario *Acelerado*, es el que requiere elevar menor cantidad de agua en condiciones de abundancia y le sigue el escenario *Mejorado*, pero a medida que aumenta la escasez asociada a una PE95% y el aumento de demanda con los años, se tendría que encender la PEAP Parrillar, operación que se busca evitar por su complejidad operacional, siendo el escenario *Acelerado* el que requiere elevar mayor cantidad de agua.

El costo que implica operar con uno u otro escenario, se evalúan en el siguiente capítulo de acuerdo a los costos operacionales de cada planta elevadora. Se determinará el potencial ahorro que generaría operar con un escenario *Mejorado* o *Acelerado* con respecto al escenario *Actual*, y, consecuentemente, los costos adicionales que involucraría encender la PEAP Parrillar.

7 EVALUACIÓN DE COSTOS, RESTRICCIONES Y RECOMENDACIÓN DE OPERACIÓN

El menor volumen a ser suministrado desde el sistema de impulsión, en los escenarios *Mejorado* y *Acelerado*, producto de la optimización del uso del embalse, genera ahorros en los costos de energía eléctrica en la operación de Aguas Magallanes S.A.

Para estimar la diferencia de costos entre los distintos escenarios, se trabaja con los datos operacionales que ha facilitado la Empresa acerca de sus consumos de energía y los volúmenes impulsados para determinar la conveniencia de modificar la forma en que se opera el embalse Lynch.

7.1 ANÁLISIS DE COSTOS

En la sección 4.2.3 se presentó el costo unitario de elevación de un metro cúbico por cada planta elevadora, y resultó un valor de \$150/m³ desde la PEAP Parrillar hasta la PEAP Leñadura y de \$29/m³ desde la PEAP Leñadura hasta la planta de tratamiento.

En las siguientes secciones, se presenta cada año modelado en función de cada probabilidad de excedencia, también la información acerca de los volúmenes de elevación por cada planta elevadora y los costos asociados.

7.1.1 Año 2015

Gráfico 7.1: Costos operacionales – Año 2015

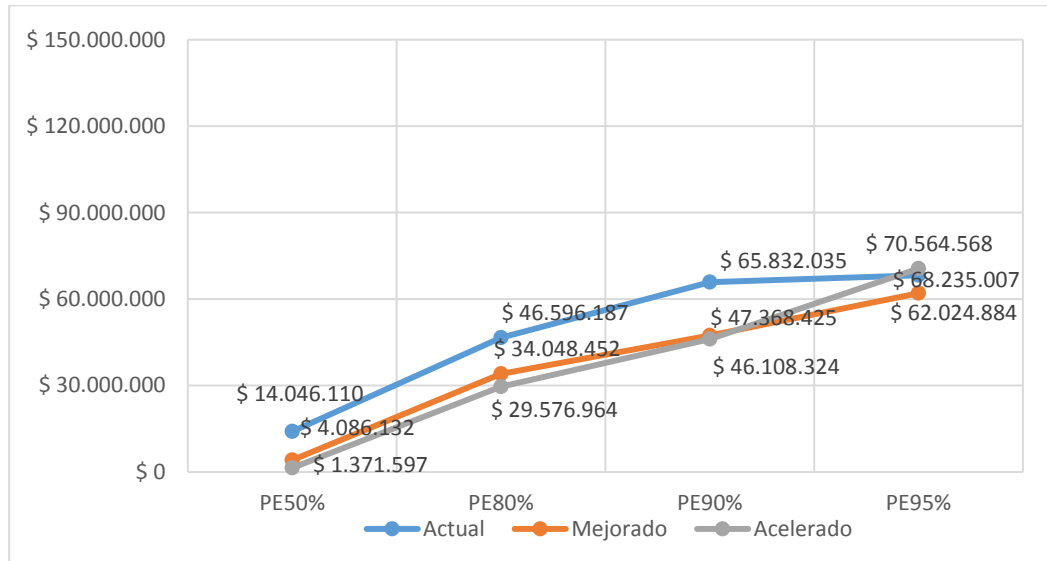
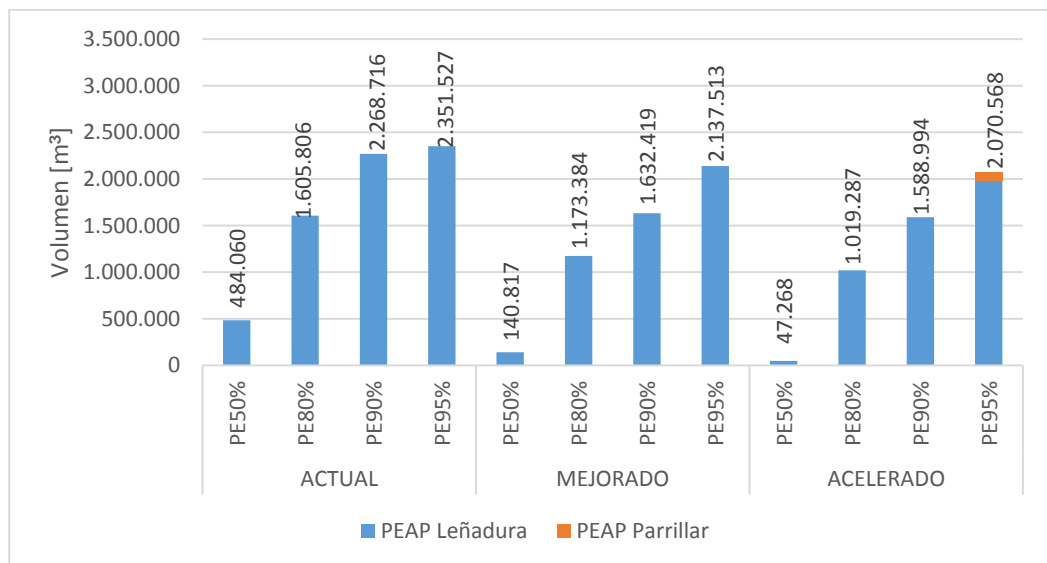


Gráfico 7.2: Volúmenes totales de elevación – Año 2015



Bajo un pronóstico optimista asociado a un año lluvioso al considerar una PE50%, la mejor opción de controlar el embalse Lynch hubiese sido el escenario *Acelerado*, cuyos volúmenes y costos de operación son los más bajos, siendo un 66% más bajo que el escenario *Mejorado* y un 90% menos en relación al escenario *Actual*.

De igual forma, bajo una condición de recarga asociado a una PE80%, sigue siendo la mejor alternativa el escenario *Acelerado*, al ser un 13% menor que el escenario *Mejorado*, y un 37% más bajo que el escenario *Actual*.

Al ocurrir una PE90%, se puede ver en los gráficos anteriores que la diferencia entre el escenario *Mejorado* y *Acelerado*, es marginal y es de tan solo un 3%. De igual forma, en ambos escenarios, los costos son alrededor de un 29% menos que el escenario *Actual*.

Por último, para una condición de escasez asociada a una PE95%, se observa que la mejor alternativa hubiese sido el escenario *Mejorado*. A pesar que el volumen del escenario *Acelerado* es menor, por el contrario, sus costos serían los más altos, superando incluso los costos del escenario *Actual*. Esto se debe al uso de la PEAP Parrillar y su elevado costo de operación.

El análisis del comportamiento del año 2015 para la modelación realizada, indica que la mejor forma de haber utilizado el embalse hubiese sido el escenario *Mejorado*, disminuyendo paulatinamente su nivel, sin el riesgo de operar con la PEAP Parrillar, consiguiendo disminuir los costos de operación entre los MM\$10 y MM\$20, incluso si hubiese ocurrido un evento de sequía, éstos hubiesen sido en torno a los MM\$6.

7.1.2 Año 2020

Gráfico 7.3: Costos operacionales – Año 2020

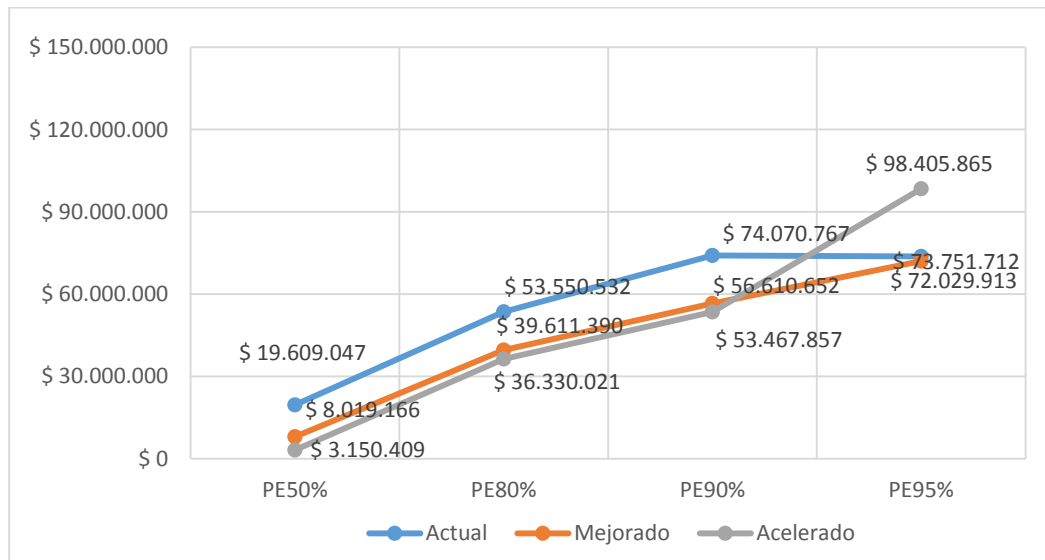
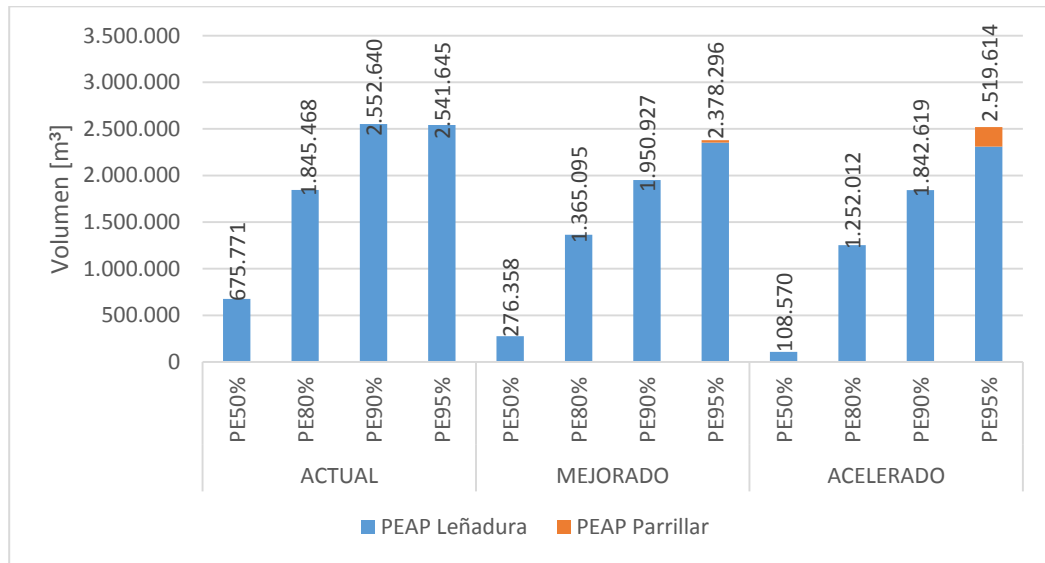


Gráfico 7.4: Volúmenes totales de elevación – Año 2020



Considerando la proyección de demanda del año 2020, bajo expectativas de lluvia de PE50% la mejor opción para operar el embalse sería el escenario *Acelerado*, siendo sus costos un 61% y 84% menor que los escenarios *Mejorado* y *Actual* respectivamente. De forma similar ocurre ante una PE80%, cuyos costos con respecto al escenario *Actual* son 32% menor y con respecto al escenario *Mejorado* tan solo un 8% menor.

Luego, ante un evento asociado a una PE90%, la diferencia entre los costos de operación de los escenarios *Mejorado* y *Acelerado* disminuye aún más quedando por debajo del 6%.

En contraste a la modelación del año 2015, para una PE95% los costos de operación del escenario *Predictivo* con respecto a los escenarios *Actual* y *Mejorado* serían mayores en un 33% y 44% respectivamente, y de acuerdo a los volúmenes de elevación, el escenario *Mejorado* requeriría de la PEAP Parrillar, y producto de ello, sus costos con respecto al escenario *Actual* no diferirían en más de un 7%.

De igual forma, si llegase a ocurrir un evento asociado a PE95%, seguiría siendo la mejor opción controlar el embalse bajo un escenario *Mejorado* disminuyendo los costos de operación entre MM\$11 y MM\$17, y en condiciones asociadas a una PE95% serían en torno a los MM\$5.

7.1.3 Año 2025

Gráfico 7.5: Costos operacionales – Año 2025

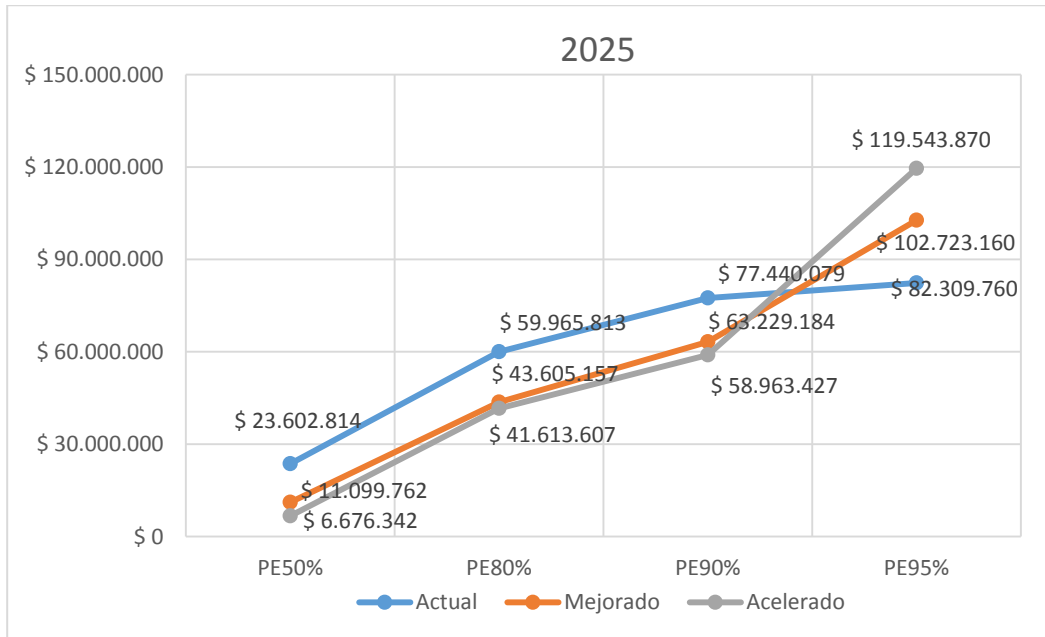
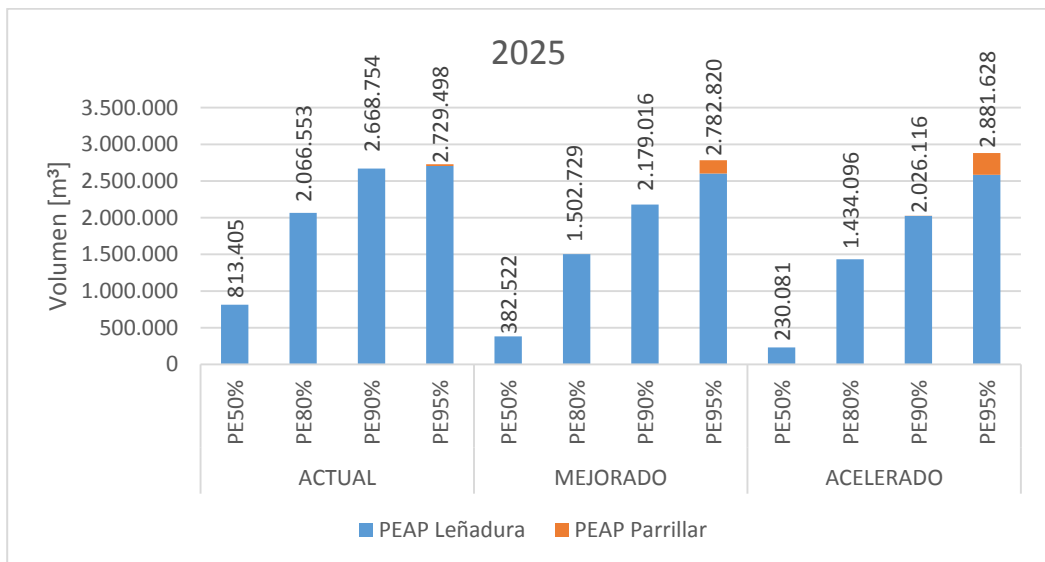


Gráfico 7.6: Volúmenes totales de elevación – Año 2025



Al considerar la proyección de demanda del año 2025, al igual que la modelación realizada para los años anteriores, el escenario *Acelerado* mantiene sus costos de operación bajo los costos del escenario *Mejorado* y *Actual*, esto para PE50, 80 y 90%.

Con respecto al escenario *Mejorado* sería entre MM\$2 a MM\$4 menos y al escenario *Actual* en torno a los MM\$17.

De acuerdo a la modelación y con el aumento de demanda proyectada, en condiciones de sequía asociadas a una PE95% y con la infraestructura actual, los costos del escenario *Mejorado* y *Acelerado* serían mayores que el escenario *Actual* en un 25% y un 45% respectivamente.

Entonces, lo más conveniente para el año 2025 y en esta condición de sequía, sería mantener el uso *Actual*, cuya consigna es liberar el agua del embalse sólo para evitar, en lo posible, utilizar la fuente más costosa, la PEAP Parrillar

7.1.4 Año 2030

Gráfico 7.7: Costos operacionales – Año 2030

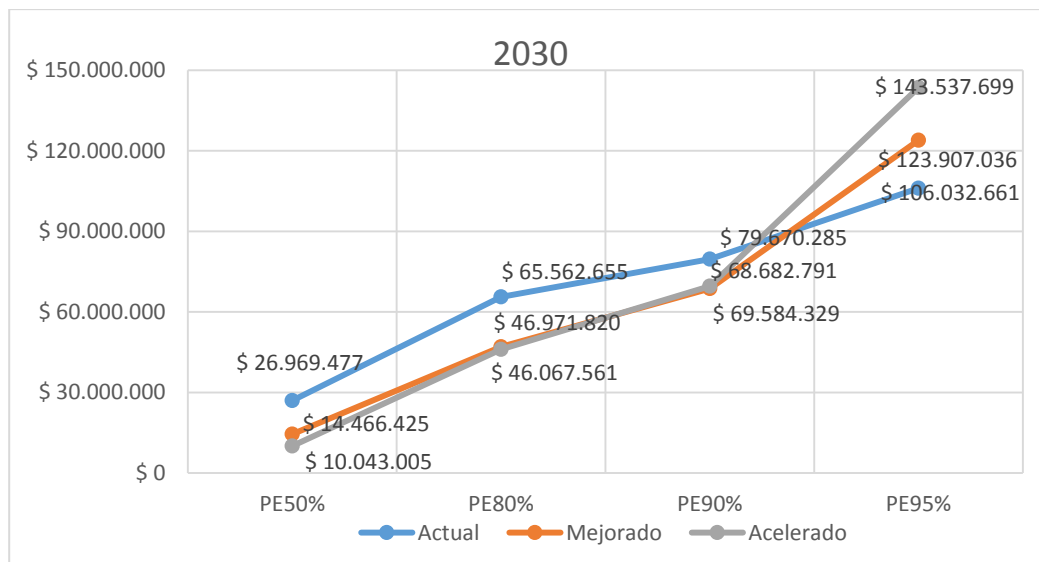
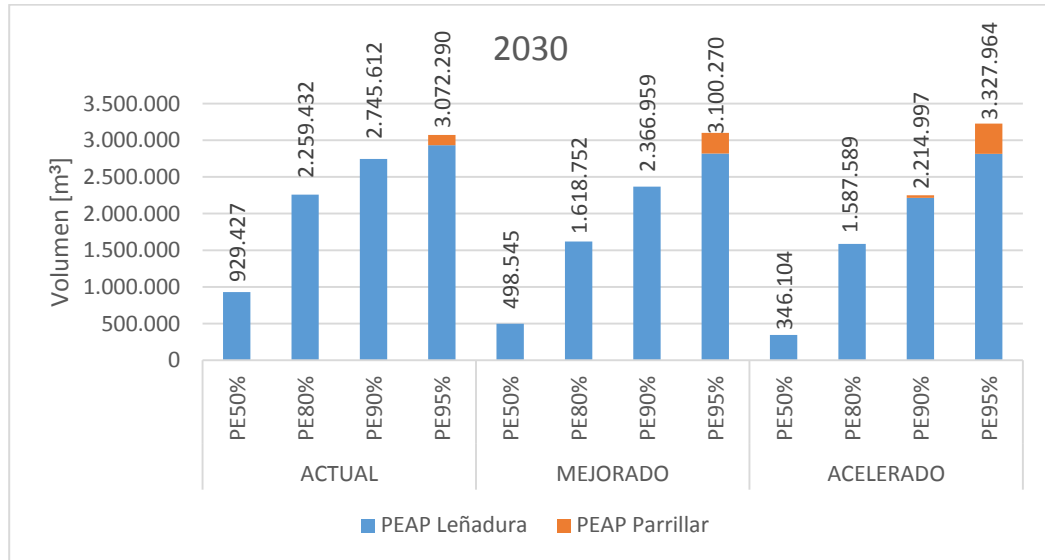


Gráfico 7.8: Volúmenes totales de elevación – Año 2030



En la modelación del año 2030 se puede observar en el gráfico de los costos operacionales que el escenario *Mejorado* tendería a comportarse como el escenario *Acelerado* al intentar evitar el uso de la PEAP Parrillar, esto ocurriría para las PE50%, PE80% y PE90%.

Al igual que el año 2025, considerando la infraestructura existente, la proyección de demanda y una condición de sequía asociada a una PE95%, sería conveniente limitar el uso del embalse y utilizarlo sólo para evitar utilizar la PEAP Parrillar, o al menos, para disminuir sus volúmenes de elevación, ya que de acuerdo al gráfico de volúmenes totales de elevación, sería inevitable su utilización.

De esta manera, la mejor alternativa para operar el embalse, sería mantener la condición actual ya que tanto el escenario Mejorado como Predictivo en condiciones de sequía, superan en aproximadamente MM\$20 a MM\$40 al escenario Actual.

7.2 RESTRICCIONES Y CONSIDERACIONES OPERATIVAS

El modelo se ha desarrollado considerando la capacidad de diseño de las distintas captaciones y la disponibilidad de agua en las fuentes, de acuerdo a distintas probabilidades de excedencia, sin embargo, en la práctica, algunos de los supuestos utilizados pueden no reflejar la realidad operacional del sistema y antes de llevarlo a la práctica se deben considerar los siguientes aspectos:

- La evaluación de costos operaciones sólo considera los costos energéticos asociados al funcionamiento de las PEAP, asumiendo una composición físico – química equivalente en las distintas fuentes. Por lo tanto, no se consideró como variable la calidad de las aguas ni sus implicancias en el costo del tratamiento con productos químicos. En una segunda etapa, se puede analizar las características y diferencias entre una u otra fuente, e incorporarlos en la evaluación económica.
- Las captaciones no siempre funcionan a su máxima capacidad por falta de mantenimiento o por variabilidad en las condiciones de escurrimiento en las fuentes. Para asegurar la disponibilidad del agua bajo distintas PE, es necesario que las captaciones estén en condiciones adecuadas para su uso, lo que no siempre sucede. Para evitar riesgos operativos, se sugiere realizar las actividades de mantenimiento antes del inicio del periodo de regulación (noviembre), en todas las captaciones, y aumentar la seguridad y flexibilidad operacional frente a cualquier condición.



Figura 7.1: Estado de las Captaciones Tres Brazos y Leñadura – Visita a terreno 26/11/15

De hecho, en la visita a terreno se pudo constatar que a fines de noviembre aún no se realizaba mantenimiento a las captaciones del río Tres Brazos ni Leñadura, que son parte del sistema de impulsión (Figura 7.1), y tampoco en el río Las Minas (Figura

7.2), que forma parte del sistema gravitacional, cuyo uso en verano es primordial para la producción.



Figura 7.2: Estado de la Captación Las Minas – Visita a terreno 26/11/15

- La infraestructura del lago Parrillar debiera estar operativa para su eventual funcionamiento en cada verano. Si bien hace más de una década que no se utilizan las aguas de este lago, por la forma de operación *Actual* del embalse Lynch, los resultados de la simulación indican que sí se requiere de su funcionamiento para eventos de años secos, por lo que se deben mantener las instalaciones para que llegado el momento funcione correctamente.
- Otro aspecto a considerar es el monitoreo y eventual instalación de sensores de nivel y alarmas de rebose en las presas auxiliares y en la captación Lynch, y la activación remota de las válvulas reguladoras de descarga del embalse. Con estos elementos se podría controlar los siguientes casos:
 - i. Si se presentan reboses en las presas auxiliares se activaría la alarma y se podría activar la apertura de las válvulas, para evitar el derrame de agua por estas unidades, incluso en el escenario *Actual* que mantiene el embalse lleno.
 - ii. Si se activa la alarma en la captación Lynch, contrario del caso anterior, se estaría liberando más agua de lo que se puede derivar hacia la planta de tratamiento y en este caso se podría restringir el uso del embalse para no descargar más agua de lo necesario.

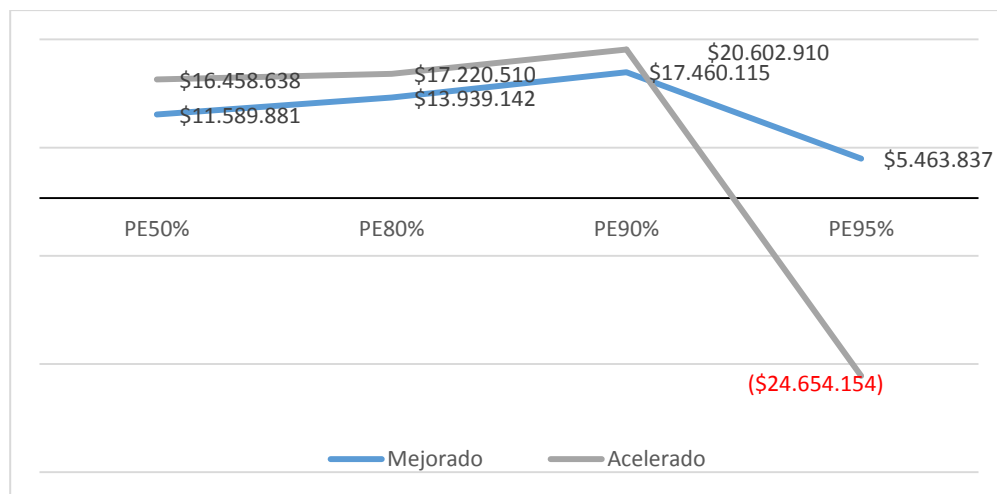
De esta forma se tendría un sistema controlado por telemetría que hoy no existe y se podría seguir una trayectoria de descenso definida, operación que hoy se hace con un ajuste manual según la experiencia del operador.

7.3 ELECCIÓN DEL ESCENARIO

Teniendo en cuenta los costos operacionales, que aumentan a medida que la probabilidad de excedencia aumenta, es decir, cuando la oferta de los caudales medios mensuales de las captaciones disminuye, y las restricciones del modelo descritas anteriormente, se analiza en esta sección los resultados obtenidos para indicar el escenario de operación más recomendable, ante distintas expectativas de precipitación y en función de la proyección de demanda. Esto se realiza en base a la diferencia de costos con respecto al escenario *Actual* tras implementar un escenario *Mejorado* o *Acelerado*. Estos son presentados en los gráficos 7.9, 7.10 y 7.11.

Si los pronósticos fuesen ajustados a un año lluvioso, para precipitaciones asociadas a PE50%, PE80% resultaría conveniente operar el embalse de acuerdo al escenario *Acelerado*, ya que bajo este criterio de operación, aun cuando el embalse haya agotado sus reservas al llegar febrero, existiría suficiente oferta en el resto de las fuentes, sobre todo las del sistema gravitacional, para suplir lo que falte sin la consecuencia de un aumento del uso de la PEAP Leñadura, ni la necesidad de operar Parrillar.

Gráfico 7.9: Diferencia de costos operacionales c/r al escenario Actual – Año 2020



La diferencia, sin embargo, es marginal con el escenario *Mejorado* donde los costos asociados al funcionamiento de las PEAP aumentan aproximadamente a MM\$4 y MM\$2 para PE50% y PE 80% respectivamente.

Ante un pronóstico asociado a una PE90% de los caudales medios mensuales de las captaciones, la diferencia entre los escenarios en cuestión, se hace menor, y para el año 2030, según el Gráfico 7.11 sería el escenario *Mejorado* el que consiga mayores ahorros.

Gráfico 7.10: Diferencia de costos operacionales c/r al escenario Actual – Año 2025

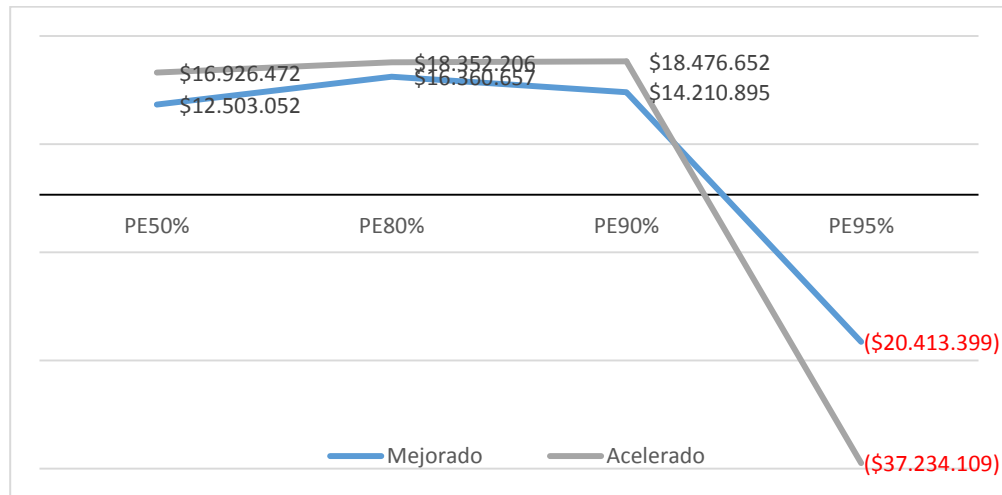
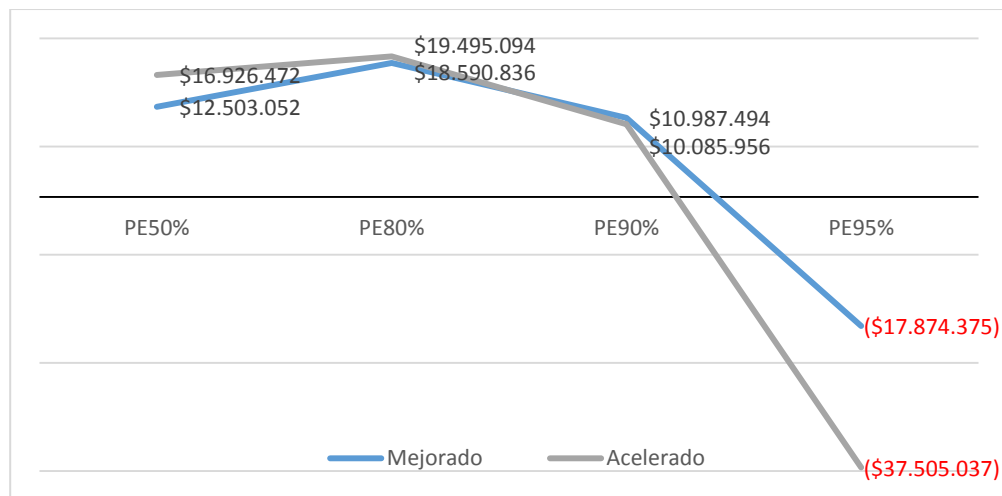


Gráfico 7.11: Diferencia de costos operacionales c/r al escenario Actual – Año 2030



Ahora bien, para un pronóstico precipitaciones de escasez, asociado a una PE95%, la mejor alternativa sería operar con un escenario *Mejorado*, ya que el escenario *Acelerado* tendría como consecuencia el uso de la PEAP Parrillar, aumentando los costos globales de operación, llegando a superar los costos del escenario *Actual*, desde los MM\$24 para el año 2020 hasta los MM\$37 en el año 2030.

Pero incluso bajo el criterio de operación del escenario *Mejorado*, en condiciones de escasez, en el año 2025 aumentarían los costos por sobre el escenario *Actual* debido a que se estaría utilizando la PEAP Parrillar. De esta forma, hacia el año 2025, la mejor opción sería mantener el criterio actual de operación que vendría siendo el escenario *Actual*, solo si, ocurriera un evento de escasez asociado a una PE95% en las precipitaciones y caudales medios mensuales de las cuencas que abastecen la ciudad.

Es evidente que el beneficio que se obtiene con el escenario *Acelerado* respecto del *Mejorado*, en condiciones de relativa abundancia, es marginal, y genera un riesgo mayor en caso de no generarse las lluvias y caudales esperados en las fuentes de la ciudad durante los últimos meses del verano.

Esta incertidumbre para alcanzar un eventual mayor ahorro, bajo la condición de acertar en la proyección de precipitaciones, sumado al riesgo de falla de la operación de la PEAP Parrillar, en los más de 30 [km] de impulsión y aducción que tiene que recorrer el agua para llegar al estanque de acumulación Leñadura, llevan a la conclusión que no se justifica adoptar este escenario de operación respecto de uno un poco más conservador, como el *Mejorado*. En otras palabras, el riesgo de apostar a condiciones de caudal y lluvias futuras, no se refleja en un beneficio significativo que lo justifique.

Por otra parte, sea cuál sea la condición del año presentada, el análisis nos indica que la *Actual* operación del embalse Lynch parece ser demasiado conservadora y convendría adoptar un criterio más atrevido, pero controlado, como el escenario *Mejorado*, de manera de alcanzar ahorros en la producción de agua potable de la ciudad en torno a los MM\$14 anuales.

En cualquiera de los casos, e independientemente de la modificación o no de los criterios de operación del embalse, sí es recomendable incorporar unidades de control, monitoreo y accionamiento remoto en varios puntos del sistema de producción, tanto para flexibilizar y optimizar la operación, como para atender emergencias o condiciones particulares, como mantenimiento o eventuales contaminaciones de algunos ríos.

En este contexto, destaca la necesidad de mantener operativa la línea de Parrillar, que en algunos escenarios de precipitación o contingencia, podría tener que funcionar de manera irrevocable, para asegurar la continuidad de servicio, y el mantenimiento permanente de las fuentes gravitacionales e impulsadas.

En este último punto, podría ser recomendable la modificación de las captaciones de Leñadura y Tres Brazos, hacia una barrera transversal o un sistema de punteras, de manera que no se vea afectada la capacidad de captación por las variaciones del lecho en esa zona.

Aun cuando la proyección de demanda se cumpliera y la escasez hídrica se hiciera presente, el servicio de producción de agua potable de la ciudad de Punta Arenas se encuentra garantizado y cuenta con el respaldo de múltiples fuentes de abastecimiento para mantener su continuidad. Sin embargo, para mejorar la operación es necesario mantener y monitorear el estado de la infraestructura, y así el impacto que genere el funcionamiento de las plantas elevadoras pueda ser minimizado.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, el correspondiente análisis y de acuerdo a los objetivos planteados inicialmente se establece que:

- El modelo de simulación operacional del embalse Lynch refleja la variación de su nivel y la regulación que genera en el sistema de producción. Esto se pudo validar según el registro histórico que dispuso la Empresa y al ajuste satisfactorio del régimen de cuencas que describe el estudio hidrológico, logrando reproducir los periodos de deshielos y de estiaje. También, la modelación sugiere utilizar las aguas del embalse durante noviembre hasta abril, desde su máxima capacidad hasta el nivel mínimo operacional, debido a que las condiciones del entorno facilitan su recarga, incluso en condiciones de escasez, volviéndose a recargar a comienzos de otoño y alcanzar el máximo al llegar noviembre.
- El funcionamiento de la PEAP Leñadura depende del uso del embalse Lynch y de la oferta del resto de las fuentes del sistema gravitacional. Al limitar el uso del embalse en los periodos de estiaje, genera un incremento en los volúmenes a elevar y en consecuencia los costos de producción.
- Modificando el uso del embalse Lynch se puede generar importantes disminuciones en los costos de operación de la PEAP Leñadura. En condiciones de relativa abundancia, el escenario *Mejorado* puede generar una disminución de los costos de operación en MM\$14, y el *Acelerado* en torno a los MM\$17 con respecto al escenario *Actual*. Sin embargo el beneficio marginal generado por el escenario *Acelerado* respecto del *Mejorado* en condiciones de abundancia, resulta en una operación más riesgosa ante pronósticos de escasez intensa (PE95%) ya que requiere del funcionamiento de la PEAP Parrillar cuya operación se busca evitar debido a sus altos costos de operación, la complejidad operacional y su vulnerabilidad al estar a 35 [km] de la ciudad.
- Se propone modificar la actual operación del embalse Lynch hacia un escenario *Mejorado*, disminuyendo paulatinamente su nivel generando ahorros en la producción en torno a los MM\$14 anuales. Se utilizarán las aguas del embalse durante todo el periodo de regulación hasta alcanzar el mínimo operacional a fines de Abril, ya que el riesgo de comenzar en Mayo y que no haya suficiente oferta en los ríos o que no se encuentre disponible el embalse, obligando al uso de la PEAP Parrillar, queda completamente acotado, ya que de acuerdo al análisis esto no ocurriría ni siquiera

para PE95%. Se recomienda, de cualquier forma, mantener Parrillar operable, para una eventual condición más extrema de escasez

- Con un sistema optimizado y controlando, las probabilidades de usar el sistema de Parrillar son bajas y se pueden disminuir aún más. Se propone estudiar la posibilidad de cambiar la captación superficial del río Tres Brazos, a una captación subterránea tipo dren, para aprovechar los importantes caudales que dispone. En consecuencia, la captación tendría una disponibilidad más permanente sobre todo en la época de estiaje y también, de mejores condiciones al ser filtrada naturalmente. Además, se estaría utilizando los mismos derechos constituidos sin mover el punto de captación.
- Un último aspecto a considerar es estudiar la viabilidad de entubar la salida del agua del embalse hasta la planta de tratamiento, para que, en vez de descargar al chorrillo Lynch cuya longitud es de 3,5 [km], se realice por medio de una conducción y que no se pierda alrededor del 20% por infiltración como sucede hoy.

REFERENCIAS

AGUAS MAGALLANES S.A., Actualización planes de desarrollo Aguas Magallanes S.A. 2016 – 2030. Abril 2015.

AGUAS MAGALLANES S.A. Memoria anual 2014.

CADA-IDEPE Consultores en Ingeniería. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad - Cuenca del río Las Minas. DGA 2004.

HARAMBOUR, Fernando. Determinación de caudales de estiaje en fuentes de abastecimiento de agua de Punta Arenas. Aguas Magallanes 2000.

HARAMBOUR, Fernando. Evaluación hidrológica de las fuentes de abastecimiento de agua potable de Punta Arenas. Aguas Magallanes S.A. 2013.

INE – Medio Ambiente. Memoria anual 2014.

KAMMAM, Pedro. Apuntes del curso de Proyecto Hidráulico – CIV349. Departamento de Obras Civiles. UTFSM 2012.

MOP. Plan regional de infraestructura y gestión del recurso hídrico 2012.

SISS. Estudio tarifario Aguas Magallanes S.A. Periodo 2006 – 2011.

ANEXOS

ANEXO A: Resumen de la infraestructura existente.....	66
ANEXO B: Oferta natural separada por fuentes [L/s].....	68
ANEXO C: Capacidad acueducto de descarga.....	69
ANEXO D: Planilla MS Excel del modelo de simulación del embalse.....	72
ANEXO E: Resultados de la modelación.....	73
ANEXO F: Datos operacionales.....	75

ANEXO A: RESUMEN DE LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE

Para tener mayor claridad de la infraestructura existente del sistema productivo de agua potable de Punta Arenas, se presenta como resumen con sus características principales, las captaciones, conducciones y canalizaciones, estanque de producción, plantas elevadoras y planta de tratamiento.

Tabla A.0.1: Captaciones Superficiales

Captación	Tipo de Fuente	Dimensiones Barrera		Altura Torre [m]	Caudal de Diseño [L/s]	Caudal de Producción [L/s]	Derechos de Agua [L/s]
		Longitud [m]	Alto [m]				
Las Minas	Río Las Minas	18	3,2	-	560	500	400
Embalse Lynch	Embalse Lynch	-	-	10	-	194	52
Captación Lynch	Chorrillo Lynch	7	2	-	380	380	-
Ciervo Sur	Estero El Cable	8	2,7	-	23	70	120
El Cable	Estero El Cable	29,2	3,5	-	24	18	18
Leñadura	Río Leñadura	12	1,2	-	65	150	200
Tres Brazos	Río Tres Brazos	8,5	1,9	-	123	225	455
Parrillar	Lago Parrillar	-	-	-	-	140	1200

Fuente: Plan de Desarrollo Aguas Magallanes S.A.

Tabla A.0.2: Conducciones y Canalizaciones Sistema Gravitacional

Nombre	Tipo	Diámetro [mm]	Material	Longitud [m]	Capacidad [L/s]
Ciervo Norte	Aducción	-	Otro material	300	43,0
Ciervo Sur	Aducción	300	Asbesto cemento	1300	106,0
Ac. Laguna Lynch	Acueducto	-	Otro material	3500	600,0
Ac. Rio de las Minas 3	Acueducto	500	Asbesto cemento	350	294,4
Ac. Rio de las Minas 2	Acueducto	800	Otro material	120	753,6
Ac. Rio de las Minas 1	Acueducto	800	Otro material	120	753,6
Ad. Rio de las minas 1 (acero)	Aducción	550	Acero	2170	356,2
Ad. Rio de las Minas 2 (cem. Asb.)	Aducción	300	Asbesto cemento	2180	106,0
Ad. Rio de las Minas 3 (FF)	Aducción	350	Fierro Fundido	2180	144,2

Fuente: Plan de Desarrollo Aguas Magallanes S.A.

Tabla A.0.3: Conducciones Sistema Impulsión

Nombre	Tipo	Diámetro [mm]	Material	Longitud [m]	Capacidad [L/s]
Aducción Captación a PEAP Parrillar	Aducción	500	HDPE	221	228,6
Impulsión Parrillar	Impulsión	500	Asbesto cemento	3670	294,4
Aducción Parrillar	Aducción	400	Asbesto cemento	28092	188,4
Aducción Parrillar	Aducción	500	Asbesto cemento	1080	294,4
Aducción 3 Brazos	Aducción	400	Asbesto cemento	1628	188,4
Aducción Parrillar y 3 Brazos	Aducción	850	Acero negro	4748	850,7
Aducción Parrillar y 3 Brazos	Aducción	700	Acero negro	54	577,0
Aducción Parrillar y 3 Brazos	Aducción	600	Acero negro	118	423,9
Aducción Leñadura	Aducción	350	Asbesto cemento	583	144,2
Impulsión Leñadura	Impulsión	850	Acero negro	2422	850,7
Impulsión Leñadura	Impulsión	900	Acero negro	6813	953,8

Fuente: Plan de Desarrollo Aguas Magallanes S.A.

Tabla A.0.4: Plantas Elevadoras

Nombre	Caudal [L/s]	Altura Manométrica [m]	Potencia [kVA]	Número de Bombas
PEAP Parrillar	200	50	445	3+1
PEAP Leñadura	358	90	853	4+2

Fuente: Base de Datos de Infraestructura 2014

Tabla A.0.5: Estanque de Producción

Estanque	Tipo	Volumen [m³]	Cota Radier [m]	Cota Aguas Máx. [m]
Leñadura	Semi - Enterrado	1000	6,07	10,55

Fuente: Plan de Desarrollo Aguas Magallanes S.A.

Tabla A.0.6: Planta de Tratamiento de Agua Potable

Nombre	Tipo	Caudal de Diseño [L/s]	Capacidad Actual de Tratamiento [L/s]	Tipo de Desinfección	Tipo de Fluoruración	Elementos a Abatir
PTAP Nueva	Filtros Rápidos	380	380	Gas Cloro	Fluorsilicato	Mn, Fe, Color, Turbiedad

Fuente: Nueva Base de Infraestructura 2014

ANEXO B: CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL

Tabla B.1: Datos de las curvas de variación estacional [L/s]

LMB	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
50%	742,0	886,1	1081,6	1112,8	937,6	1277,8	1572,1	502,4	216,1	209,7	239,1	476,1
80%	474,7	588,6	699,8	658,1	601,7	984,1	965,9	305,5	101,5	100,5	144,6	257,6
90%	375,9	475,2	557,3	500,1	477,2	858,5	748,8	235,6	68,4	68,4	111,2	186,9
95%	310,0	398,3	461,8	398,6	394,0	767,0	606,9	190,1	49,3	49,8	89,5	143,4

ELB	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
50%	90,9	123,3	153,2	158,3	130,6	174,4	224,5	68,6	33,0	31,5	32,7	68,5
80%	47,0	70,9	93,4	88,6	78,9	117,6	129,4	38,0	15,1	15,2	16,4	35,5
90%	33,3	53,1	72,2	65,5	60,6	95,7	97,0	27,9	10,1	10,4	11,4	25,2
95%	25,0	41,8	58,3	51,0	48,8	80,7	76,4	21,6	7,2	7,6	8,5	19,0

CSB	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
50%	55,4	69,5	89,8	93,1	80,9	104,2	133,7	39,5	19,3	18,4	18,9	39,0
80%	28,5	38,6	53,5	50,1	47,4	68,8	77,5	21,0	9,1	8,6	9,4	19,3
90%	20,1	28,3	40,8	36,2	35,8	55,5	58,3	15,1	6,1	5,8	6,5	13,4
95%	15,1	22,0	32,6	27,7	28,4	46,4	46,1	11,5	4,4	4,2	4,8	9,9

CNB	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
50%	41,3	56,2	70,6	67,8	60,6	81,5	104,0	31,5	14,3	14,2	14,3	30,7
80%	19,9	31,4	41,9	34,0	35,2	54,7	59,4	17,1	6,3	6,8	6,9	15,5
90%	13,6	23,1	31,9	23,7	26,5	44,4	44,3	12,4	4,1	4,7	4,7	10,8
95%	9,9	18,0	25,5	17,6	20,9	37,4	34,8	9,5	2,9	3,4	3,4	8,0

ELY	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
50%	40,1	52,8	65,9	68,0	58,5	76,3	96,9	30,0	13,1	12,9	13,3	29,7
80%	19,4	29,9	39,8	37,8	34,7	50,8	54,4	16,9	5,9	5,8	6,3	15,0
90%	13,3	22,2	30,5	27,8	26,4	41,0	40,2	12,5	3,9	3,8	4,3	10,5
95%	9,7	17,3	24,5	21,6	21,1	34,4	31,3	9,8	2,8	2,7	3,1	7,8

TBC	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
50%	1430,6	1918,3	2781,9	2948,5	2523,3	3489,8	3963,7	1338,0	602,8	429,4	374,4	822,4
80%	874,9	1283,7	1942,9	2023,7	1752,6	2549,3	2616,7	814,0	331,3	239,3	237,0	497,5
90%	676,6	1040,6	1610,5	1662,2	1448,6	2163,3	2106,1	627,8	242,3	176,3	186,6	382,6
95%	547,2	875,0	1379,3	1413,0	1237,7	1889,1	1760,5	506,6	187,2	137,0	153,1	308,0

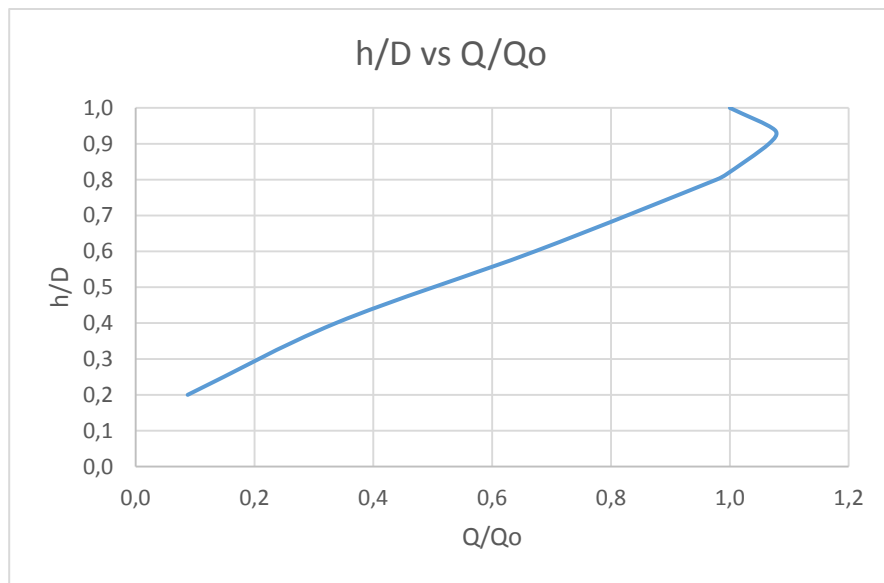
LDC	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
50%	447,8	595,8	869,1	885,9	767,3	1099,3	1229,1	422,2	197,6	140,4	116,3	259,2
80%	258,4	368,3	575,2	559,5	499,9	810,3	797,1	252,9	104,9	76,2	64,4	145,4
90%	193,9	286,5	463,6	440,1	399,6	690,8	635,6	193,4	75,3	55,4	47,3	107,5
95%	152,9	232,8	387,9	360,9	332,1	605,6	527,2	155,0	57,3	42,6	36,6	83,8

Fuente: Elaboración propia

ANEXO C: CAPACIDAD ACUEDUCTO DE DESCARGA

La capacidad del acueducto de descarga se maximiza cercana a un flujo lleno, esto se produce cuando la relación entre la altura de escurrimiento y el diámetro tiene un valor de 0,9382. El efecto de la fricción que genera un escurrimiento a boca llena disminuye su capacidad, esto se representa en el gráfico siguiente.

Gráfico C.0.1: Capacidad de Porteo del Acueducto de Descarga



Fuente: Elaboración propia

A partir del valor de $h/D = 0,9382$, por medio de la ecuación de manning se calcula la capacidad máxima de porteo del acueducto de descarga del embalse Lynch siendo su máxima capacidad de $1,918 \text{ [m}^3/\text{s]}$.

La toma de agua el embalse se realiza a 210,8 [msnm] por medio de dos tubos de acero de 300 [mm] de diámetro.

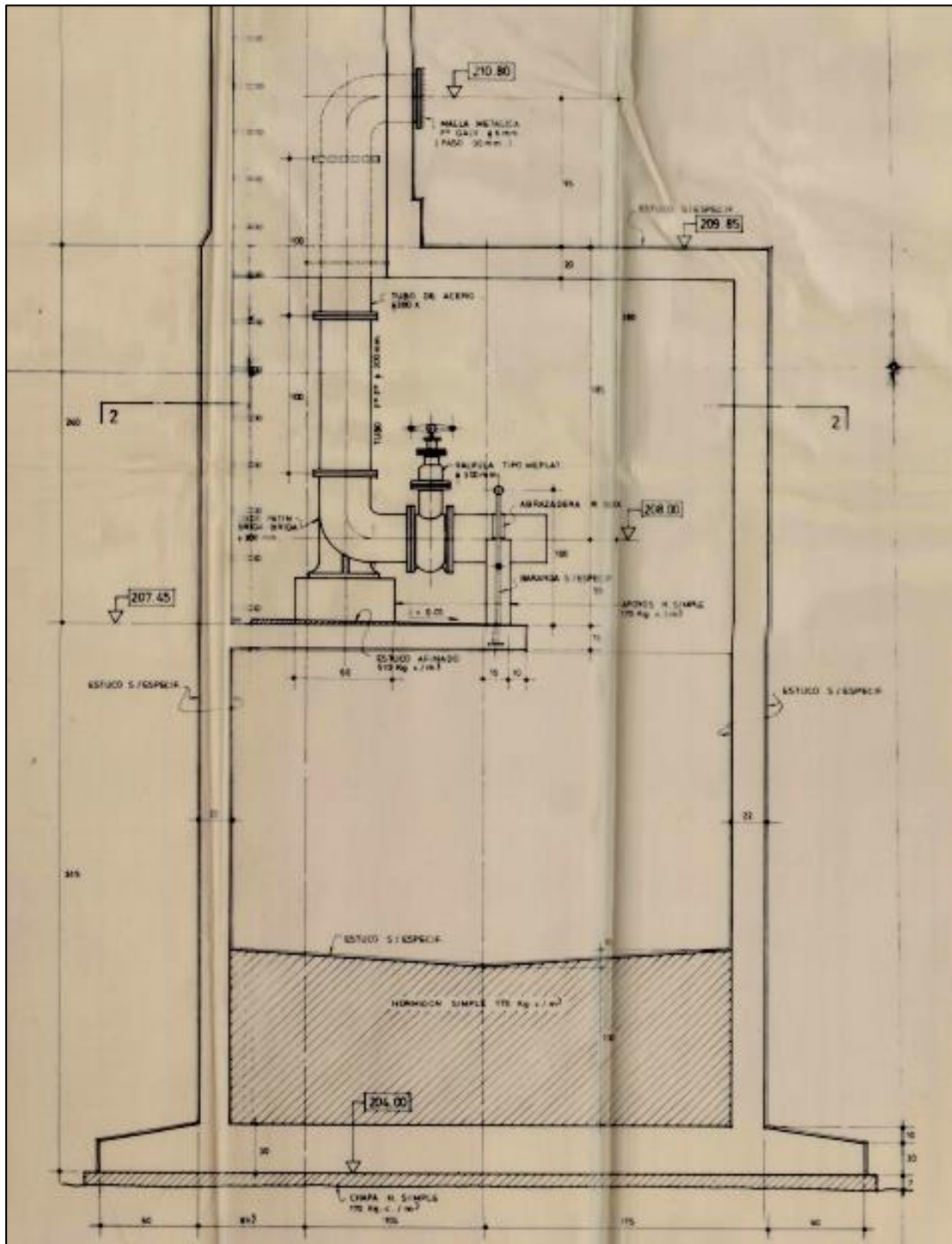


Figura C.0.1: Obra de Toma del Embalse Lynch

Fuente: Aguas Magallanes S.A.

ANEXO D: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Tabla E.1: Resultados de la simulación

Escenario Actual												
50%			80%			90%			95%			
	R	VLeñadura	VParrillar	R	VLeñadura	VParrillar	R	VLeñadura	VParrillar	R	VLeñadura	VParrillar
NOV	197.433	0		109.451	-14.758		69.353	-222.266	0	44.572	-356.545	0
DIC	96.119	-296.579		22.929	-651.301		2.134	-753.562	0	0	-812.234	-157.455
ENE	85.586	-275.545		17.171	-611.570		0	-710.365	-89.711	0	-767.719	-286.758
FEB	82.918	-123.634		20.908	-391.741		0	-484.627	0	0	-544.237	-85.127
MAR	217.502	0		112.346	-75.913		69.636	-293.025	0	13.106	-426.250	0
ABR	289.327	0		159.282	0		108.052	0	0	74.861	-9.541	0
SUMA	968.885	695.758	0	442.087	1.745.284	0	249.175	2.463.846	89.711	132.540	2.916.527	529.339
PROM	161.481	-115.960			-290.881			-410.641			-486.088	-88.223
DESV	86.000	140.349			299.995			293.547			295.475	116.248

Escenario Mejorado												
50%			80%			90%			95%			
	VSalida	VLeñadura	VParrillar	VSalida	VLeñadura	VParrillar	VSalida	VLeñadura	VParrillar	VSalida	VLeñadura	VParrillar
NOV	372.982			285.112			245.053	-26.224	0	220.298	-180.307	
DIC	273.352	-77.897		200.618	-490.807		179.967	-609.588	0	168.219	-677.659	-22.879
ENE	265.782	-62.920		197.899	-453.251		178.167	-567.832	0	166.774	-634.300	-153.339
FEB	264.093			203.019	-229.326		184.978	-336.645	0	174.472	-404.659	
MAR	396.304			293.069			251.118	-92.130	0	226.194	-245.295	
ABR	465.425			338.000			287.646		0	255.005		
SUMA	2.037.937	140.817	0	1.517.716	1.173.384	0	1.326.929	1.632.419	0	1.210.962	2.142.220	176.218
PROM	339.656	-70.409		252.953	-391.128		221.155	-326.484		201.827	-428.444	-88.109
DESV	84.500	10.590		60.233	141.377		46.353	266.260		37.066	223.700	92.249

Tabla E.1: Resultados de la simulación (Continuación)

Escenario Acelerado												
	50%			80%			90%			95%		
	V _{Salida}	V _{Leñadura}	V _{Parrillar}	V _{Salida}	V _{Leñadura}	V _{Parrillar}	V _{Salida}	V _{Leñadura}	V _{Parrillar}	V _{Salida}	V _{Leñadura}	V _{Parrillar}
NOV	548.586			460.835			420.819		0	396.090	-39.673	
DIC	450.917			378.700	-348.341		358.212	-466.992	0	346.562	-534.984	
ENE	447.402			380.191	-307.418		360.700	-421.806	0	349.464	-488.148	-7.186
FEB	95.458	-47.268		35.266	-363.528		17.463	-470.657	0	7.088	-538.566	-79.456
MAR	223.397			121.017			79.357	-229.539	0	54.619	-382.555	
ABR	290.869			163.758			113.509		0	80.934		
SUMA	2.056.629	47.268	0	1.539.767	1.019.287	0	1.350.060	1.588.994	0	1.234.759	1.983.926	86.642
	342.772	-47.268		256.628	-339.762		225.010	-397.248		205.793	-396.785	-43.321
	169.181			171.980	29.022		173.907	113.992		175.839	209.332	51.103

Fuente: Elaboración propia

ANEXO E: DATOS OPERACIONALES

No se consideraron los meses entre Agosto hasta Diciembre del 2014 y los meses de Junio y Julio del 2015 ya que igual existen cargos fijos aunque no se utilice la planta pero en dichos meses no se elevó ningún volumen.

Tabla F.1: Datos operacionales

Mes	Energía kWh	Costo \$	Leñadura + Tres Brazos m ³	\$/kWh	\$/m ³
ENE-14	33.024	1.978.655	100.200	59,92	19,75
FEB-14	40.320	2.254.412	101.160	49,07	22,29
MAR-14	104.640	5.204.118	287.280	18,91	18,12
ABR-14	77.760	4.073.319	180.720	25,45	22,54
MAY-14	21.120	1.490.613	39.960	93,69	37,30
JUN-14	34.560	2.875.571	90.720	57,25	31,70
JUL-14	11.520	1.048.824	17.280	171,76	60,70
AGO-14	1.920	530.294	0	1.030,55	-
SEP-14	2.880	516.050	0	687,03	-
OCT-14	1.920	863.361	0	1.030,55	-
NOV-14	1.920	877.521	0	1.030,55	-
DIC-14	1.920	882.185	0	1.030,55	-
ENE-15	31.680	2.594.622	100.796	62,46	25,74
FEB-15	83.520	5.206.891	243.716	23,69	21,36
MAR-15	149.760	8.835.924	431.280	13,21	20,49
ABR-15	201.600	11.365.042	503.998	9,81	22,55
MAY-15	46.080	2.943.235	76.320	42,94	38,56
JUN-15	2.880	610.630	0	687,03	-
JUL-15	2.880	514.454	0	687,03	-
AGO-15	7.680	758.824	21.000	257,64	36,13

PROMEDIO	68,14	29,02
-----------------	--------------	--------------

Fuente: Aguas Magallanes S.A.