

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**ANÁLISIS DE DESCARGA DE LAS LAGUNAS UBICADAS EN LA
CUENCA DEL RÍO RÍMAC PARA EL MAYOR APROVECHAMIENTO
ENERGÉTICO**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

RICARDO FAVIO CISNEROS CUTIPA

**PROMOCIÓN
2003 - I**

**LIMA – PERÚ
2009**

**ANÁLISIS DE DESCARGA DE LAS LAGUNAS UBICADAS EN LA
CUENCA DEL RÍO RÍMAC PARA EL MAYOR APROVECHAMIENTO
ENERGÉTICO**

Dedico este informe a mi hija Xiomara por llenarme de alegría todos los días, mi esposa Marisol por brindarme su amor y paciencia en los momentos más difíciles, mi madre Nancy por su enseñanza y motivación en cada etapa de mi vida, mi padre Vidal por su apoyo incondicional y sus sabios consejos y a mis hermanas Giovanna y Analiz por el cariño que ellas siempre me brindan.

SUMARIO

En el presente informe se plantea un método para resolver la problemática del caudal de agua a descargar en las distintas lagunas y embalses que se encuentran ubicados en la cuenca del río Rímac, respetando los acuerdos establecidos con los demandantes de agua y las limitaciones por capacidad hidráulica, buscando el máximo aprovechamiento hidroenergético de la cuenca.

Para lograr nuestro objetivo de forma práctica, se desarrollará un programa computacional que permita simular la operación de un sistema hídrico conformado por lagunas, embalses, demandantes de agua y centrales hidráulicas con el fin de optimizar la generación hidráulica y asignar de forma eficiente el recurso hídrico en nuestro sistema.

Para ello se desarrolló e implementó un modelo matemático en base a programación lineal que tiene como objetivo maximizar la generación hidráulica y reducir el impacto de los reboses o pérdidas en los embalses, lagunas y centrales hidráulicas del sistema, teniendo como premisa, una política de asignación, un perfil de consumo de los demandantes de agua y una matriz de caudales naturales llamados también afluentes, en los distintos nodos de nuestro sistema.

La implementación del programa se elaboró en el lenguaje de programación Visual Basic, de manera que el usuario a través de ventanas y gráficos pueda observar en forma sencilla y práctica todos los agentes involucrados en el sistema hídrico, pudiéndose diseñar a criterio nuestro y en forma simplificada distintas topologías para su análisis.

Adicionalmente se expone la operación y coordinación del sistema eléctrico peruano asociado a la operación de descarga de las lagunas y de las centrales hidráulicas de Lima. Finalmente se discute el tema de la gestión y manejo del agua en los últimos 30 años, donde se aborda el tema del mercado de aguas y se describe las experiencias de algunos países que han desarrollado este sistema de gestión.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA

SUMARIO

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.	Antecedentes	3
1.2.	Planteamiento del problema	6
1.3.	Objetivos	8
1.4.	Alcances	9

CAPITULO II

GESTION INTEGRAL DEL AGUA EN OTROS PAÍSES

2.1.	Gestión del Agua	10
2.1.1.	Mercado de Aguas	10
2.1.2.	Entidades de Gestión del Agua a Nivel de Cuenca	12
2.2.	Evaluación y Priorización de cuencas	14
2.2.1.	Evaluación de la gestión de cuencas	14
2.2.2.	Métodos de priorización de cuencas	15
2.3.	Técnicas de Optimización para el aprovechamiento hidroenergético	19
2.3.1.	Modelos de Simulación en Sistemas Hídricos	20
2.3.2.	Modelos de Optimización en Sistema Hídricos	21
2.3.3.	Criterios de Gestión en Recursos Hídricos	23
2.3.4.	Métodos de Optimización en Sistemas de Recursos Hídricos	25

CAPITULO III

GESTION Y MANEJO DE CUENCAS EN EL PERÚ

3.1.	Antecedentes	29
3.2.	Generalidades	30
3.3.	Gestión Integrada del Agua	31

3.3.1. Cuenca Hidrográfica	32
3.3.2. Gestión de Cuencas	33
3.3.3. Manejo de Cuencas	35
3.4. Marco Regulatorio en el Perú	36
3.4.1. Reformas en la Legislación del Agua	38
3.4.2. Situación Actual	41

CAPITULO IV

COORDINACIÓN Y OPERACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO RÍMAC

4.1. Ubicación y Extensión	43
4.2. Obras Hidráulicas existentes	44
4.3. Memoria Descriptiva de las subcuencas del Río Rímac	47
4.3.1. Subcuenca Santa Eulalia	48
4.3.2. Subcuenca Marcapomacocha	48
4.3.3. Subcuenca Rímac	48
4.4. Comunicación y Control del Sistema de Lagunas y Embalses en la cuenca del Río Rímac	49
4.4.1. Equipamiento	49
4.4.2. Tiempo de Respuesta de Maniobras	51
4.5. Coordinación y Operación de las Centrales Hidráulicas en la cuenca del Río Rímac	53
4.5.1. Central Huinco	53
4.5.2. Central Matucana	55
4.5.3. Central Callahuanca	56
4.5.4. Central Moyopampa	58
4.5.5. Central Huampaní	58
4.6. Coordinación y Operación del Sistema Eléctrico Peruano	62
4.7. Coordinación y Operación del Sistema de Agua Potable para Lima Metropolitana	63
4.7.1. Regulación en el Sector Saneamiento	63
4.7.2. Operación del Sistema de Agua Potable en Lima y Callao	70
4.7.3. Relación de entidades públicas y privadas con Sedapal	70

CAPITULO V

METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN

5.1.	Modelo Matemático del problema	73
5.1.1.	Función Objetivo	73
5.1.2.	Restricciones	73
5.1.3.	Notación	74
5.1.4.	Variables	74
5.2.	Método de Optimización	75
5.2.1.	Optimizador ILOG CPLEX	75
5.2.2.	Librerías del optimizador CPLEX	76
5.3.	Implementación del programa	78
5.3.1.	Objeto Afluente	78
5.3.2.	Objeto Embalse o Toma	78
5.3.3.	Objeto Central Hidráulica	79
5.3.4.	Objeto Demandante de Agua	80
5.3.5.	Objeto Canal o Trayectoria	80
5.4.	Aplicación al problema	82
5.4.1.	Sistema de afluentes y embalses	84
5.4.2.	Sistema de centrales hidráulicas	85
5.4.3.	Sistema de demandantes de agua	85
5.4.4.	Sistema de canales y trayectorias	85
5.4.5.	Consideraciones al problema planteado	86
CAPITULO VI		
ANÁLISIS DE RESULTADOS		
6.1.	Análisis de resultados	88
6.1.1.	Planta Atarjea	88
6.1.2.	Centrales Hidráulicas	89
6.1.3.	Embalses y Lagunas	90
6.1.4.	Regantes	92
6.2.	Sensibilidades con diferentes escenarios hidrológicos	93
6.2.1.	Análisis con año hidrológico húmedo	93
6.2.2.	Análisis con año hidrológico seco.	96
CONCLUSIONES		99
ANEXOS		100

Anexo 1. Especificaciones Técnicas de Embalses y Lagunas.

Anexo 2. Propiedades de Canales y Trayectorias.

Anexo 3. Configuración Hidrológica del Sistema de Lagunas y Cuencas del río Rímac.

Anexo 4. Dotación de agua para regantes ubicados a lo largo del río Rímac.

BIBLIOGRAFÍA

PROLOGO

El capítulo I empieza con la introducción del informe, donde se menciona los antecedentes relacionados a este trabajo para luego plantear la problemática y detallar los objetivos que se pretende en este trabajo así como los alcances del mismo.

En el capítulo II, se expone la gestión integral del agua en otros países, que en la mayoría de ellos se señala a la cuenca hidrográfica como base para la gestión del agua. Se introduce después en el tema de mercado de aguas, que actualmente es adoptado por Chile, luego se menciona importantes entidades de la gestión del agua en América Latina. Se describe también diferentes criterios y técnicas de optimización en sistemas de recursos hídricos.

En el capítulo III, se revisa la gestión de cuencas de nuestro país y se explica las diferencias de dos conceptos importantes que generalmente son tomados de igual manera, pero la experiencia demuestra que son temas diferentes como son: la gestión y manejo de cuencas; que a su vez están interrelacionados para llegar a una gestión integral del agua. Se expone también el marco regulatorio desde sus inicios hasta la actualidad. En este tema se observa como la gestión de cuencas está relacionada a varios sectores económicos por el que existe mucha controversia y básicamente se debe a la búsqueda del máximo beneficio intersectorial, solución que usualmente no es factible si uno o varios agentes son rígidos en su posición.

En el capítulo IV, se describe la coordinación y operación de la cuenca del río Rímac donde se incluye dos procesos importantes y relacionados en la gestión y manejo de cuencas como son la operación de las lagunas y embalses asociados a la cuenca del río Rímac y la operación de las centrales hidráulicas de Edegel. También se verá el rol de un ente técnico relacionado a la generación eléctrica como es el Comité de Operación Económica del Sistema (COES) que es el encargado de coordinar la operación del sistema eléctrico nacional al mínimo costo y preservando la seguridad del sistema eléctrico. Finalmente se expondrá la participación de un importante agente que es Sedapal, por ser el demandante de agua más importante para brindar el servicio de agua potable para la ciudad de Lima.

En el capítulo V, se formula el método o modelo matemático que optimiza la generación hidráulica asociada a un sistema hídrico. Luego se explica brevemente la implementación del programa así como sus componentes y herramientas. Finalmente se lista la información base para los distintos agentes, que se utilizará para el análisis al problema.

En el capítulo VI, se analizan los resultados del problema planteado utilizando el programa computacional desarrollado, observando el comportamiento de nuestros agentes por medio de cuadros y gráficos. Se concluye el presente trabajo realizando dos sensibilidades al problema planteado: uno con información hidrológica húmeda y el otro con hidrología seca.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El Perú cuenta con una gran cantidad de cuencas hidrográficas y estas se pueden agrupar según la derivación del agua de los ríos en tres tipos de vertientes, la vertiente del Pacífico, la vertiente del Atlántico y la del Lago Titicaca.

Según los últimos estudios de INRENA recientemente reconocidos a inicios del 2008, el Perú cuenta en la vertiente del Pacífico con 62 cuencas hidrográficas que se caracterizan por presentar escasas precipitaciones en sus partes altas. En la vertiente del Atlántico se ubican 84 cuencas que se caracterizan por una mayor precipitación. En la vertiente del Titicaca se encuentran 13 cuencas que se caracterizan por la irregularidad de sus precipitaciones.

En la vertiente del Pacífico se encuentran tres subcuencas importantes para el desarrollo productivo de la ciudad de Lima, las dos primeras son las subcuencas del Rímac y Santa Eulalia que conforman el río Rímac y la subcuenca del río Chillón. Estas subcuencas son aprovechadas a través de un sistema de embalses, tomas, cámaras de carga, canales, etc. para el abastecimiento de agua a diferentes tipos de usuarios como agricultores, centrales de generación eléctrica, centros recreacionales, servicio de agua potable, etc.

El recurso hídrico demandado por la ciudad de Lima, proviene principalmente de los deshielos y precipitaciones presentes en las partes altas de la cuenca del río Rímac, estos a su vez son embalsados en periodo de lluvias o avenida y descargados en época de estiaje para poder atender la demanda de agua de los distintos usuarios. Un aporte importante proviene también del trasvase de la cuenca del Atlántico a la cuenca del Pacífico por medio del Túnel Trasandino. Finalmente la otra fuente de agua para la ciudad de Lima proviene del agua disponible en el río Chillón y de las aguas subterráneas.

Respecto al recurso natural del agua, la “Ley de Recursos Hídricos” aprobado recientemente por el Congreso de la República el 31 de marzo del 2009, en su artículo N° 1 señala: “el agua es un recurso natural renovable, indispensable para la vida, vulnerable y estratégico para el desarrollo sostenible, el mantenimiento de los sistemas y ciclos naturales que la sustentan y la seguridad de la Nación”. Adicionalmente en relación a su uso, en el artículo N° 2 se indica:

“... sólo puede ser otorgada y ejercida en armonía con el bien común, la protección ambiental y el interés de la Nación. ...”.

Por lo mencionado, es de esperarse que el uso adecuado del agua es todo un reto, ya que se tiene que concertar con diferentes entidades de distintos sectores, por lo que es necesario plantear un sistema integral del agua. Cabe señalar que en caso de declararse escasez de agua y/o ante la previsión de escasez debe limitarse el uso de este recurso de acuerdo con lo que manda la ley. Es decir, asegurar el recurso para el uso primario o uso directo, como para las necesidades básicas, para el uso poblacional y luego al uso productivo. Debe recordarse que la generación de energía hidráulica tiene fin social y contribuye en el desarrollo del país.

Uno de los sectores de gran importancia en la cadena de la gestión del agua es la generación hidroeléctrica, que se ha desarrollado principalmente en las subcuencas del Rímac, Santa Eulalia y Mantaro, donde la potencia efectiva de las centrales hidráulicas al 2008 se encuentra en 571 MW en el Rímac-Santa Eulalia y de 933 MW en el Mantaro sumando así un 53% de la potencia efectiva hidráulica del Sistema Eléctrico Peruano [1].

La generación hidráulica está ligado a los ciclos hidrológicos presentes en las cuencas, de las cuales podemos mencionar cuatro periodos; el primero se caracteriza por tener un periodo de abundantes precipitaciones llamado también periodo de avenida, con una duración estimada de cuatro meses, luego se presenta un periodo de escasez o insuficientes precipitaciones llamada también periodo de estiaje, esta se presenta en un periodo de seis meses; los otros dos periodos se presentan en cada mes de transición del periodo de avenida - estiaje y de estiaje - avenida.

Tabla N° 1.1 Capacidad por subcuenca (Millones m³)

	Capacidad por Subcuenca (Mio. m ³)			
	Santa Eulalia	Rímac	Total	Incremento
Antes de 1960	77.0		77.0	77.0
1963	174.1		174.1	97.1
1995	174.1	48.3	222.4	48.3
2000	234.1	48.3	282.4	60.0

Por otro lado, las empresas de Edegel y Sedapal desde inicios de los años 1960 han venido realizando inversiones en conjunto para explotar las cuencas del Pacífico y del Atlántico. Entre los principales podemos mencionar el proyecto Marca I y el Túnel Trasandino en el año 1963, luego en el año 1995 entró en operación el embalse de Yuracmayo y más adelante a

fines del año 1999 se invirtió en el proyecto de Marca III y la ampliación del embalse de Antacoto, cuyos resultados se muestra en la Figura N° 1.1 y las Tablas N° 1.1 y 1.2.

Tabla N° 1.2 Porcentaje de Inversiones por empresa

	Incremento de Capacidad Mio. m3	Inversión por el incremento de Capacidad			
		EDEGEL		SEDAPAL	
		%	Mio. m3	%	Mio. m3
Antes de 1960	77.0	100%	77.0		
1963	97.1	100%	97.1		
1995	48.3	70%	33.8	30%	14.5
2000	60.0	31%	18.6	69%	41.4
TOTAL	282.4	80%	226.5	20%	55.9

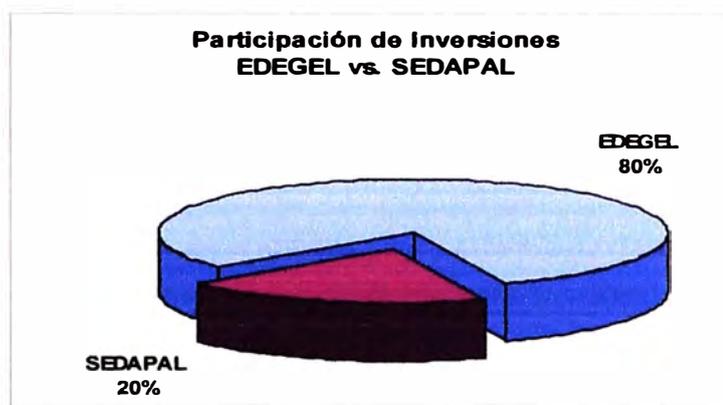


Figura 1.1. Participación de Inversiones

Estas medidas de inversión logradas entre la empresa estatal y privada lograron que en conjunto mejore el bienestar social y el desarrollo del país. Sedapal logró aumentar sus reservas de agua para garantizar el abastecimiento de agua potable para Lima, en tanto que Edegel logró aumentar su capacidad de regulación estacional y horaria de sus centrales, disminuyendo además los riesgos de racionamiento eléctrico en años hidrológicos secos. Además de estas medidas de inversión, era necesario asegurar y establecer una política de gestión en el manejo de cuencas y embalses, para lograr un desarrollo sostenible y de bien común para los intereses del estado y de todos los sectores involucrados. Hoy en día estas medidas y políticas no son claras y de concertación con todos los usuarios, para ello el estado y varias instituciones siguen trabajando a través de programas pilotos en algunas microcuencas, así como en la parte normativa donde su avance ha sido lento y complicado por ser un tema sociopolítico.

Actualmente, Edegel y Sedapal se reúnen en forma periódica para acordar el nivel de caudal a descargar en los embalses ubicados en las subcuencas Santa Eulalia y Rímac durante el periodo de estiaje y el nivel de volumen objetivo embalsado, siendo esto actualizado y modificable cada vez que las condiciones hidrológicas y pronósticos varíen respecto a la condición inicial. Estos acuerdos responden a un compromiso social por velar la seguridad del abastecimiento de agua potable y generación eléctrica, tanto para la ciudad de Lima como para el sistema eléctrico nacional.

1.2. Planteamiento del Problema

La población de Lima al 2007 asciende a más de 8 millones de habitantes y la cobertura de agua potable en Sedapal está en el orden de 85.5%, con una producción media de agua potable de 20.64 m³/s proveniente de diversos tipos de fuentes de producción, en el 2008 la producción aumentó a 20.90 m³/s [2] como se muestra en la Tabla N° 1.3 y la Figura N° 1.2.

Tabla N° 1.3 Producción de agua potable por tipo de fuente (Miles de metros cúbicos)

TIPO DE FUENTE	PERIODO 2008												TOTAL 2008	O.Prom. m ³ /s.
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC		
Plantas	49,258	48,285	51,963	50,248	45,993	40,265	41,611	40,657	37,289	38,044	38,817	42,957	525,366	16.7
Atarjea	45,236	43,631	46,560	45,048	43,705	40,265	41,611	40,657	37,289	38,044	38,817	42,957	503,818	16.0
Chillón	4,022	4,654	5,403	5,201	2,288	0	0	0	0	0	0	0	21,568	0.7
Pozos	8,195	6,928	7,000	6,496	8,702	10,611	12,458	12,041	14,879	16,359	15,093	14,801	133,363	4.2
Lima	7,325	6,533	6,716	6,204	7,803	9,023	10,586	10,061	11,399	12,836	12,229	12,116	112,820	3.6
Callao	870	395	284	293	899	1,588	1,872	1,980	3,480	3,522	2,864	2,485	20,533	0.7
TOTAL	57,453	55,213	58,963	56,745	54,695	50,876	54,069	52,698	52,167	54,402	53,910	57,558	658,749	20.9

Para garantizar el abastecimiento de agua potable, tanto el gobierno como las empresas privadas están realizando estudios de proyectos de ampliación de embalses, nuevas presas y analizando otras tecnologías de cómo obtener este recurso escaso a futuro. Actualmente Sedapal tiene planeado realizar el proyecto derivación Huascacocha - Rímac, como afianzamiento al sistema Marcapomacocha.

La cuenca del río Rímac cuenta por el lado del Pacífico con 15 lagunas con un volumen útil de 77 Millones m³ y la represa Yuracmayo con 48.3 Millones m³; y por el lado del Atlántico cuenta con 5 lagunas con 157 Millones m³, estos embalses son operados por Edegel y supervisados por Sedapal, dichas lagunas proveen de agua al río Rímac principalmente en periodos de estiaje cuando las precipitaciones son escasas.

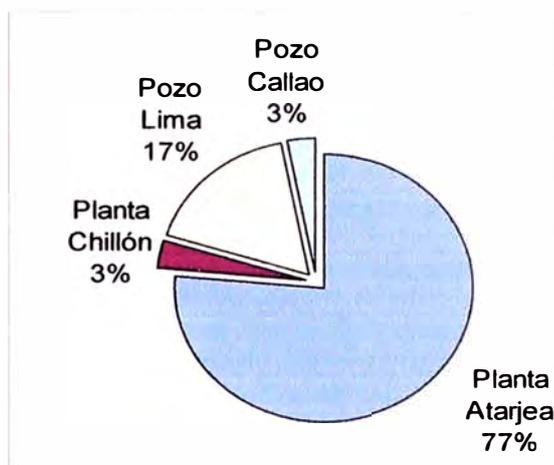


Figura N° 1.2. Producción por tipo de fuente.
Año 2008

Por otro lado, a lo largo de las subcuencas Santa Eulalia y Rímac se encuentran ubicados 5 centrales hidroeléctricas pertenecientes a la empresa Edegel, que se caracterizan por aprovechar el caudal del río Rímac para la generación eléctrica, de los cuales podemos mencionar a la centrales de regulación: Huinco con una potencia efectiva de 247 MW y Matucana con una potencia efectiva de 129 MW; luego tenemos las centrales de pasada como Callahuanca con 80 MW, Moyopampa con 65 MW y Huampaní con 30 MW que abastecen de energía eléctrica en parte al Sistema Interconectado Nacional (SINAC).

Uno de los problemas principales en la generación hidráulica es la limitación del caudal turbinado en los periodos de estiaje, debido a una menor asignación o descarga en las lagunas y embalses, en cumplimiento a los acuerdos que existe entre Sedapal y Edegel en su "Plan de Descargas" las cuales responden a políticas de optimización y seguridad en la operación y producción de la planta Atarjea de Sedapal el cual abastece de agua potable a Lima Metropolitana, esto también sucede cuando se corre el riesgo de que el siguiente año se presente un año o ciclo hidrológico seco.

Otro de los problemas frecuentes en el manejo, operación y coordinación de los embalses en la cuenca del río Rímac son el consumo de los regantes no registrados que se ubican a lo largo del río Rímac, esta alteración en la información de la demanda no estimada da lugar a un deficiente manejo integral del sistema de lagunas, embalses y presas, pudiendo ser perjudicial para alguno de los procesos productivos presentes en la cadena del agua.

Por todo lo expuesto, se tuvo la necesidad de desarrollar una herramienta flexible que nos indique la manera eficiente de distribuir los caudales a través de los distintos embalses y lagunas existentes en la cadena del agua, cumpliendo con todas las restricciones asociadas

como la demanda de agua y los límites en los embalses, canales y plantas de generación con el fin de maximizar la generación hidroeléctrica.

En este informe se ha desarrollado un programa que abarca todas estas restricciones permitiendo al usuario crear y representar en forma visual y amigable la topología de cualquier sistema de lagunas y embalses, centrales hidráulicas y demandantes de agua como son los regantes y la demanda para el servicio de agua potable.

1.3. Objetivos

El presente informe tiene como objetivo principal maximizar la generación hidroeléctrica de las centrales hidráulicas de Edegel ubicadas a lo largo de las subcuencas Santa Eulalia y Rímac tomando una política de manejo y gestión del recurso hídrico, respetando los límites permisibles del sistema, demandas de agua y tiempos de transporte.

El manejo de cuencas y embalses se plantea buscando maximizar la generación hidroeléctrica minimizando el impacto de los reboses presentes en el sistema, donde el usuario define a su propio juicio o análisis los parámetros asociados. Para ello se desarrolló un programa computacional que en base a un modelo matemático de optimización lineal se obtiene las distintas variables asociadas al sistema hídrico.

El desarrollo del programa se hizo en lenguaje de programación Visual Basic que través de ventanas y gráficos se puede representar a los principales agentes de nuestro sistema hídrico y resolver de manera sencilla y práctica el problema de asignación de recursos.

El programa utiliza una de las librerías del optimizador CPLEX para resolver el problema de programación lineal.

En resumen el informe tiene como objetivo:

- a) Desarrollar un programa computacional que simule la operación de un sistema de lagunas y embalses que puede estar asociado a varias cuencas, asociado además a un sistema de riego o demandantes de agua y un sistema de centrales hidráulicas, pudiendo encontrar de manera eficiente las asignaciones de agua.
- b) Implementar el programa computacional planteando un modelo matemático en base a programación lineal que tiene como objetivo principal maximizar la generación hidráulica y disminuir el impacto del rebose en las centrales, embalses o cámaras de carga.

- c) Elaborar el programa computacional utilizando el lenguaje de programación Visual Basic asociado al optimizador CPLEX, que permita al usuario crear, guardar y modificar de forma visual distintos sistemas hídricos para su evaluación.
- d) Simular y analizar los resultados del programa para diferentes escenarios hidrológicos.

1.4. Alcances

El informe está elaborado de tal manera que los analistas encargados de realizar el pre-despacho de las centrales hidráulicas asociados a una cuenca, sean capaces de resolver de manera práctica y eficaz la gestión y manejo de las cuencas asociados a la generación eléctrica en beneficio mutuo con los demás agentes.

La herramienta computacional desarrollada en este informe está diseñada para poder crear y modificar cualquier sistema de embalses, tomas, regantes y centrales hidráulicas sin mayor dificultad, teniendo la opción de guardar múltiples escenarios o diseños topológicos distintos.

Una limitación o simplificación del programa es que considera el factor de pérdidas por conducción de agua así como el factor de evaporación de embalses y lagunas como un parámetro constante durante el periodo de estudio.

Otro tema no menos importante, que este informe hace énfasis es el sistema de gestión del recurso hídrico aplicado a nuestro país en la actualidad. Se expone brevemente las reformas más importantes en la legislación peruana en los últimos 30 años. También se describe como alternativa de solución un mecanismo de mercado para la asignación del agua en el esquema institucional peruano, tema que ha tomado mucho interés en las últimas décadas en algunos países de América Latina y en vías de desarrollo.

CAPITULO II

GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA EN OTROS PAÍSES

2.1. Gestión del Agua

En los países de América Latina se ha intensificado la necesidad de crear instancias para la gestión del agua en el ámbito de cuencas como un medio para resolver conflictos, mejorar la administración y considerar el impacto del uso del agua sobre el medio ambiente y la sociedad.

En prácticamente todos los países de la región, diversas actividades relacionadas con la gestión y el aprovechamiento del agua se realizan a través de alguna entidad que funciona a nivel de cuencas. Sin embargo donde ya ha tenido lugar el proceso de institucionalización de gestión del agua a nivel de cuencas, éste no ha sido simple, y en muchos lugares no pasan de las intenciones, mientras que en otras existe el peligro que se pierda lo avanzado con cambios en las políticas nacionales o en las estructuras gubernamentales.

Las iniciativas de creación de entidades de gestión del agua a nivel de cuencas provienen de diferentes situaciones, normalmente por situaciones de conflicto. Las propuestas de creación de entidades de cuencas se realizan usualmente por iniciativas del Estado, las iniciativas de usuarios de agua, la de organizaciones no gubernamentales usualmente vinculadas con gobiernos locales, de agencias de cooperación externa, de organismos financiadores y ejecutores de grandes proyectos hidráulicos.

2.1.1. Mercado de Aguas

Es uno de los temas que sigue siendo polémico y que aún es mirado con desconfianza por amplios sectores sociales y económicos, y en especial por los agricultores, que consumen el 85% del agua utilizada en el país.

Se considera que el mecanismo de mercado puede reducir el acceso al agua de la agricultura y favorecer a otros sectores con mayor poder económico, y convertirse en una fuente de inestabilidad jurídica para derechos adquiridos. Asimismo, diversos grupos creen que el mercado de aguas puede agudizar la desigualdad en el acceso al recurso en función

de posiciones de dominio. En general, el rechazo a la idea de un mercado de aguas ha venido siendo formulado en medio de una reacción adversa a la privatización del recurso, confundiendo dos conceptos distintos [3].

El mercado de aguas se define como el intercambio de asignaciones de agua entre usuarios con derechos establecidos. Los intercambios pueden ser de diverso tipo, se pueden intercambiar asignaciones temporales o derechos permanentes; el intercambio puede ser al interior de una misma actividad económica o darse entre actividades económicas distintas.

La operación del mercado de aguas no tiene porque basarse en la privatización absoluta del recurso, es decir, en otorgar rango de propiedad privada a los derechos de agua. Esta opción de privatización absoluta enfrenta limitaciones para establecer un adecuado marco regulatorio en la medida que cualquier disposición de control administrativo es considerada un atentado a los derechos de la propiedad privada, generalmente con protección constitucional. El sistema de derechos que parece ser más apropiado para la operación del mercado de aguas es el de derechos de aguas condicionados, en donde el Estado o la Nación no pierden el dominio sobre el recurso pero los titulares de los derechos tienen un conjunto de opciones sobre los derechos que pueden ser valorizadas a través del mercado. Esto da origen a la aparición de un "mercado de aguas condicionado" [4].

La investigación sobre el rol y las implicancias de los mercados de aguas no es muy amplia, en gran parte porque este tipo de mercados no se desarrollan con facilidad debido a factores institucionales, económicos y políticos. Sin embargo, a partir de la década de 1980 se ha observado un mayor interés por este tema, en los países tanto desarrollados como en desarrollo. En los países en desarrollo este interés ha venido aumentando a raíz de la apertura del mercado de aguas en Chile.

La mayor parte de la literatura teórica y empírica sobre los mercados de agua proviene de países desarrollados, especialmente de zonas áridas con gran desarrollo económico como el oeste y suroeste de los Estados Unidos, algunas regiones de España y Australia. Los mercados de agua desempeñan en estas zonas un papel importante en la distribución intersectorial de este recurso, por la cual los sectores urbanos e industriales adquieren agua de la agricultura. En dichas zonas operan también mercados de agua dentro del sector agrícola, ya sea para compraventa de derechos o para arriendos temporales del acceso al recurso. En la región latinoamericana se han desarrollado algunos trabajos en Chile y México, países donde el mercado de aguas ya viene operando regularmente tanto en la agricultura como en otros sectores.

Asimismo, se considera que dicho mecanismo es más eficiente para responder a los continuos cambios que experimentan la oferta y la demanda de este recurso móvil y de costosa medición y administración, si se compara con la rigidez de la tradicional asignación administrativa.

Algunos trabajos que cabe destacar en el análisis de los mercados de aguas en países desarrollados es el de Hanak (2002) [5] para California, así como el estudio conjunto de la Australian Academy of Technological Sciences and Engineering (ATSE, 1999) para el caso de Australia. Igualmente, los trabajos de Colby, Randall y Bush (1993) [6] presentan amplia información empírica sobre el funcionamiento de los mercados de aguas en los estados áridos de los Estados Unidos, y encuentran diversos niveles de imperfecciones que limitan la eficiencia de tales mercados, sin que esto implique que ellos sean menos eficientes que los esquemas de carácter administrativo.

Un estudio interesante sobre el funcionamiento del mercado de aguas en la agricultura estadounidense es el de Miller (1987) [7], que analiza empíricamente las condiciones en las cuales un mercado de aguas controlado por los propietarios del recurso es una alternativa más eficiente que un mercado sin mayor regulación.

El funcionamiento de mercados de aguas en Chile puede agruparse según dos tendencias claramente definidas. Un grupo de investigadores considera que el mercado de aguas en Chile ha tenido efectos bastante positivos en términos de eficiencia (Hearne y Easter, 1995; Thobani, 1997) [8], y que esto habría contribuido al notable crecimiento del sector agropecuario chileno en las décadas de 1980 y 1990. Otro grupo de investigadores señala que la legislación de aguas chilena, de claro enfoque privatista, terminó generando serios problemas de acaparamiento y rigidez en la asignación de derechos privados que no han podido ser resueltos por el propio mercado (Bauer, 1995; Solanes y Dourojeanni, 1995) [9].

2.1.2. Entidades de Gestión del Agua a Nivel de Cuenca

En América Latina es poco frecuente que las funciones más significativas tales como otorgar concesiones, permisos, autorizaciones, derechos o licencias para el uso del agua superficial y subterránea, fijar límites de descarga de sustancias contaminantes, etc. se descentralice a nivel de entidades de cuencas. Las entidades de este tipo deben tener funciones bien definidas, personalidad jurídica y patrimonio propio, así como administrar presupuestos públicos o contar con la capacidad de poder realizar recaudaciones. A pesar de que la creación de entidades con estas características todavía no es común en los países de la

región, se observa una tendencia a descentralizar atribuciones de gestión del agua a nivel de cuencas.

Esta condición se encuentra principalmente en las Corporaciones Autónomas Regionales de Colombia. Las Corporaciones Autónomas Regionales se encargan de administrar, dentro de su área de jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propiciar su desarrollo sostenible, de conformidad con las políticas del Ministerio del Medio Ambiente. Las Corporaciones son entes corporativos de carácter público, integrados por entidades territoriales (departamentos, distritos, municipios y territorios indígenas) que por sus características constituyen geográficamente un mismo ecosistema o configuran una unidad geopolítica, biogeográfica o hidrogeográfica.

En Chile, por ejemplo, la Dirección General de Aguas (DGA) tiene trece Direcciones Regionales, creadas a nivel de regiones administrativas. Ha sido política permanente de la DGA ir delegando funciones en sus Jefes Regionales.

En Ecuador, el Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) opera a nivel local a través de once Agencias de Aguas, que abarcan todo el territorio del país. El ámbito territorial de las Agencias de Aguas las cuales son en general aún muy débiles en sus atribuciones y recursos, está constituido por provincias y no coincide con las áreas de las cuencas.

Un caso diferente es México, donde la Comisión Nacional del Agua (CNA) promueve la desconcentración de sus funciones en trece Gerencias Regionales, definidas de acuerdo a criterios hidrológicos y administrativos, de tal manera que las fronteras entre ellas casi coincidan con los grupos de cuencas. Otro caso similar es Uruguay, donde la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH) del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) tiene seis oficinas regionales, creadas a nivel de cuencas.

En Cuba, las Direcciones Provinciales de Recursos Hidráulicos, conjuntamente con los Complejos Hidráulicos que se les subordinan, constituyen la estructura territorial de base del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).

En Venezuela, un caso similar, pero de alcances diferentes, fue la creación, en el ámbito del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR), de autoridades únicas que realizan funciones específicas en el manejo de los recursos naturales renovables en las áreas de atención prioritaria, como son la Autoridad Única de Área de la Cuenca del Río Tuy y la Vertiente Norte de la Serranía del Litoral Central del Distrito Federal y Estado Miranda y la Autoridad Única de Área de la Cuenca del Lago de Valencia y la Vertiente Norte de la Serranía del Litoral de los Estados Aragua y Carabobo.

En Panamá, un caso de características similares, es la Autoridad del Canal de Panamá (ACP), que se encarga de la administración, el uso y la conservación del agua de la cuenca del Canal de Panamá, en coordinación con la Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM).

2.2. Evaluación y Priorización de Cuencas

Cuando se tiene la tarea de asignar recursos insuficientes, como es el agua, es necesario realizar previamente una evaluación y priorización de los ámbitos de donde implementar la ejecución de los planes de acción, a través de programas y proyectos específicos. Una metodología de priorización puede estar basada en una técnica de análisis de múltiples alternativas y criterios, donde las alternativas vienen a representar las posibilidades de implementar una acción en particular y los criterios son los atributos que hay que calificar por cada alternativa.

En primer lugar para proceder a evaluar y priorizar la cuenca en estudio, es necesario que se haya creado un equipo multidisciplinario capaz de cumplir con las labores y obligaciones de realizar una gestión integral, identificar y sensibilizar a los actores de la importancia de su desempeño, realizar una evaluación previa de la cuenca así como la elaboración de las principales acciones que se realizarán en la cuenca.

2.2.1. Evaluación de la gestión de cuencas

Con el propósito de elegir una política o estrategia en el manejo cuencas, es necesario realizar previamente un estudio sobre la gestión actual de cuencas en la zona de evaluación. Para realizar tal estudio, en Latinoamérica con ayuda de algunas instituciones se han desarrollado metodologías que buscan responder la problemática en el proceso de planificación y toma de decisiones. Entre estas instituciones podemos mencionar:

- Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial - CIDIAT (Venezuela),
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTAP (Colombia),
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL (Chile),
- Programa Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas y Conservación de Suelos - PRONAMACHCS (Perú), entre otros.

Para el análisis, deben considerarse diversas áreas temáticas, las mismas que a su vez pueden dividirse en sub-áreas.

Axel Dourojeanni en 1992 presenta un conjunto de áreas y sub-áreas temáticas que pueden considerarse en el diagnóstico de la gestión de cuencas. Asimismo Dourojeanni en 1997 propone que estas áreas temáticas pueden agruparse en dos grandes grupos definidos en Aspectos Gerenciales y Aspectos Técnicos.

En estos aspectos se evalúa cada área y sub-área por medio de parámetros y una escala de calificación que puede ser cualitativo, cuantitativo o ambas a la vez. Esta evaluación dependerá mucho de la información disponible en cada área y sub-área.

a) Aspectos Gerenciales

Dentro de los Aspectos Gerenciales se consideran:

- Política
- Socioeconómica
- Económica
- Institucional
- Recursos Humanos
- Información

b) Aspectos Técnicos

Dentro de los Aspectos Técnicos se consideran:

- Potencial de Recursos
- Aprovechamiento de Recursos
- Impactos Ambientales Negativos

2.2.2. Métodos de priorización de cuencas

La priorización tiene objetivos prácticos e importantes como son el de identificar los lugares de la cuenca, donde se concentran los problemas físicos y sociales cuyo objetivo será despertar la dinámica del lugar y llamar el interés al resto de la población y las instituciones que operan en ellas. Otro del objetivo es el de buscar la población más participativa y

eficiente para que el trabajo sea más rápido y sirva de modelo y ejemplo para el resto de pueblos ubicados en la cuenca.

Las metodologías para la priorización de las cuencas se deben hacer con variables e indicadores previamente fijados, con calificaciones que se traduzcan en puntajes sobre la base de hechos empíricos detectables por la información que se tenga en forma regular. Las variables más importantes que deberían estar presentes en la priorización son [10]:

- Potencialidad del recurso natural de acuerdo a la calidad y cantidad de cada una de las subcuencas.
- Grado de deterioro de algunos recursos naturales en relación a la inminencia de desastres naturales como erosión, deslizamientos, alud e inundaciones.
- Grado de organización y conciencia de los actores sociales de cada una de las subcuencas, prefiriendo los actores sociales con mayor iniciativa, capacidad de trabajo y colaboración.
- Capacidad de generar recursos que aporten al presupuesto del resto de la cuenca; ello permitirá mejores condiciones para el tratamiento de la cuenca.
- Potencialidad de cada una de las subcuencas a favor del impulso del ciclo hidrológico de toda la cuenca, es decir subcuencas o microcuencas que puedan reforestarse, donde puedan haber lagunas artificiales, y donde haya las más importantes fuentes de agua que puedan servir a toda la cuenca.

El caso de priorización de cuencas puede ser tratado mediante la aplicación de una técnica de criterios múltiples, en la cual los criterios están representados por los aspectos temáticos y las alternativas. El conjunto de calificaciones cuantitativas de los criterios, para el conjunto de alternativas de que se dispone, viene a constituir una matriz que a través de una metodología de cálculo se llega a obtener el ranking de alternativas.

Una forma de llegar a la obtención de este ranking es utilizando la metodología desarrollada en la Universidad de Bruselas, Bélgica. Esta técnica de análisis de múltiples criterios es denominada PROMETHEE y es la que a continuación se va explicar.

a) Metodología de PROMETHEE

El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), como técnica de decisión multicriterio, trata de establecer mediante la

evaluación, en función de k criterios, f_1, f_2, \dots, f_k , una ordenación jerarquizada en el conjunto de alternativas. Se muestra una matriz de Criterios y Alternativas en la Tabla N° 2.1:

Tabla N° 2.1 Cuadro de Criterios y Alternativas

ALTERNATIVAS							
Criterios	Objetivo	a_1	a_2	a_3	a_4	a_k	a_n
b_1	Máx o Mín	$V_{(1,1)}$	$V_{(2,1)}$	$V_{(3,1)}$	$V_{(4,1)}$	$V_{(k,1)}$	$V_{(n,1)}$
b_2	Máx o Mín	$V_{(1,2)}$	$V_{(2,2)}$	$V_{(3,2)}$	$V_{(4,2)}$	$V_{(k,2)}$	$V_{(n,2)}$
b_i	Máx o Mín	$V_{(1,i)}$	$V_{(2,i)}$	$V_{(3,i)}$	$V_{(4,i)}$	$V_{(k,i)}$	$V_{(n,i)}$
b_m	Máx o Mín	$V_{(1,m)}$	$V_{(2,m)}$	$V_{(3,m)}$	$V_{(4,m)}$	$V_{(k,m)}$	$V_{(n,m)}$

b) Cálculo de los índices de preferencia PHI

Los índices de preferencia son aquellos que resultan de la sumatoria de la comparación de parejas de alternativas por cada criterio. La comparación se realiza por objetivos aplicándose la siguiente regla:

Si el objetivo es Maximizar y $V_{i,k} > V_{i,k+1}$ entonces $P_i(V_{i,k}, V_{i,k+1}) = 1$

Si el objetivo es Minimizar y $V_{i,k} < V_{i,k+1}$ entonces $P_i(V_{i,k}, V_{i,k+1}) = 1$

Para los demás casos $P_i(V_{i,k}, V_{i,k+1}) = 0$

Donde:

$P_i(V_{i,k}, V_{i,k+1}) =$ Valor asignado a la comparación de $V_{i,k}$ con $V_{i,k+1}$ según el objetivo.

El índice de preferencia PHI se determina mediante la siguiente relación:

$$PHI(a_i, a_{i+1}) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m P_i(V_{i,k}, V_{i,k+1}) \quad (2.1)$$

Donde:

$i = 1, 2, \dots, m.$

$PHI(a_i, a_{i+1}) =$ Índice de Preferencia cuando la alternativa K es comparada con la alternativa $(k+1)$.

Los valores calculados de PHI vienen a constituir una matriz de valores de índices de preferencia, como se presenta en la Tabla N° 2.2.

Tabla N° 2.2. Matriz de Índices de Preferencia PHI

Alternativa	a ₁	a ₂	a ₃	a _k	a _n
a ₁	****	PHI _(a1,a2)	PHI _(a1,a3)	PHI _(a1,ak)	PHI _(a1,an)
a ₂	PHI _(a2,a1)	*****	.....	.....	.....
a ₃	PHI _(a3,a1)	PHI _(a3,a2)	*****	.....	.....
a ₄	.....	.....	.....	.....	.....
a _k	.....	.....	.....	*****	PHI _(ak,an)
a _n	PHI _(an,a1)	PHI _(an,a2)	PHI _(an,a3)	PHI _(an,ak)	*****

c) Cálculo de los Flujos Positivos

Los flujos positivos vienen a ser la sumatoria de los índices de preferencia PHI en sentido horizontal por cada criterio i.

$$FP = \sum_{k=1}^n \phi(C_i, C_k) \quad (2.2)$$

d) Cálculo de los Flujos Negativos

Los flujos negativos vienen a ser la sumatoria de los índices de preferencia PHI en sentido vertical por cada alternativa k.

$$FN = \sum_{k=1}^n \phi(C_k, C_i) \quad (2.3)$$

e) Ranking de Alternativas

El ranking o priorización de alternativas se realiza tanto para el flujo positivo (FP) como para el flujo negativo (FN).

En el caso del Flujo Positivo, el ranking se realiza ordenando las alternativas en forma descendente comenzando por los mayores valores de FP. Mientras que en los flujos negativos, el ranking se realiza ordenando las alternativas en forma ascendente comenzando por los menores valores de FN.

2.3. Técnicas de Optimización para el aprovechamiento hidroenergético

Actualmente, a razón de los recientes cambios climáticos que día a día se va acentuando, la mayoría de nuestra sociedad y muchas empresas han tomado conciencia, llegando a la conclusión de que la expansión y el desarrollo ilimitado, ya no son los objetivos principales en los sistemas sociales y económicos. Al contrario, estas ideas han sido sustituidas por los fines multiobjetivo ó multipropósito a gran escala que no sólo debe ser técnicamente viable, sino también en forma social, ambiental, económica y políticamente viable.

Por otro lado, el análisis de sistemas nos permite identificar y buscar situaciones de optimabilidad en términos de asignación de recursos, desarrollo económico y medio ambiente. El método utilizado para el análisis de los sistemas de recursos como el agua va asociado a la descripción de sistemas físicos y socioeconómicos por medio de modelos matemáticos.

El manejo de los recursos hídricos abarca un conjunto de actividades que tiene como objetivo la asignación del agua entre uno o varios usuarios que generalmente están en conflicto. Esto implica que en el manejo de recursos hídricos se tiene que tomar decisiones apropiadas en función a la información disponible, lo que podría lograrse con la aplicación de los conocimientos del Análisis de Sistemas.

Un sistema es un conjunto de componentes interrelacionados que forman una entidad, como por ejemplo una cuenca, que además es influenciado por fuerzas externas o aportaciones (precipitaciones) el cual produce un efecto o salida (flujo). Es decir, es un conjunto de objetos que transforma una entrada en una salida y está en función de distintos parámetros así como las políticas implantadas en el sistema; así como se muestra en la Figura N° 2.1.



Figura N° 2.1. Esquema de un Sistema de Recursos Hídricos

El análisis de sistemas implica el desarrollo e implementación de modelos matemáticos, físicos y económicos asociados en este caso a los sistemas de asignación de recursos. La mayoría de estos modelos se basan en leyes básicas de conservación de masa, energía e impulso, pero también pueden ser empíricos o estadísticos.

El propósito de estos modelos es ayudar a los ingenieros, planificadores y analistas en la identificación y evaluación de diseños alternativos para determinar cuáles cumplen los objetivos de los proyectos de manera eficiente. Los modelos de análisis de sistemas son generalmente divididos en dos categorías y son los que a continuación se van a describir, estos son: modelos de simulación y modelos de optimización.

2.3.1. Modelos de Simulación en Sistemas Hídricos

Los modelos de simulación se utilizan para predecir una respuesta del sistema a una determinada configuración de diseño con gran precisión y detalle e identificar los probables costos, beneficios e impactos de un proyecto; es decir, el modelo de simulación predice el resultado de un único conjunto específico de diseño o de variables de política. Sin embargo, el espacio posible del diseño y de los valores de política es en general infinito.

Los modelos de simulación, si bien son importantes herramientas para la gestión de sistemas, no logran identificar o reducir la búsqueda de las mejores políticas o diseños para un problema, sino que sólo localiza la respuesta del sistema a un diseño en particular que esta en función a la información prevista. Distintas simulaciones son necesarias para cada diseño o diferentes alternativas de política. En muchas situaciones el número de diseños alternativos es lo suficientemente grande como para impedir la simulación de cada alternativa.

El manejo u operación de Sistemas Hídricos suelen ser demasiado complejos, pero por medio del concepto de análisis de sistemas puede representarse en forma simplificada. El modelamiento de un sistema hidrológico es una aproximación al sistema real, donde sus entradas y salidas son variables medibles y su estructura es un conjunto de ecuaciones (en el caso de un modelo matemático) que relacionan las entradas y las salidas.

En los modelos de simulación se pueden analizar muchas configuraciones del mismo y encontrar la que mas se aproxima al objetivo buscado o la que proporciona mayores beneficios de acuerdo a los criterios establecidos.

Se pueden identificar cuatro tipos de elementos principales que forman parte de los métodos de simulación hidrológica: objetos, relaciones, variables e intervalo de tiempo.

Los objetos es el conjunto de elementos físicos y que en su conjunto constituyen el sistema de aprovechamiento de los recursos hídricos, es decir, las presas, los túneles, los aliviaderos, bombas, canales, centrales de generación, etc.

Las relaciones son las distintas interacciones que caracterizan el comportamiento de los objetos individuales del sistema. Existen dos tipos de relaciones que son fundamentales en los métodos de simulación, como son las instrucciones de operación y los criterios de operación. Las instrucciones de operación: son variables que pueden ser controladas por el analista y están íntimamente ligados a los objetivos del aprovechamiento de recurso. Los criterios de operación: permiten determinar la función objetivo que busca el modelo y la evaluación de las distintas opciones, ayudando a la comparación entre diseños de sistemas alternativos con políticas de gestión dadas.

Las variables del modelo se pueden dividir en cuatro tipos: Las variables de estado, que indican la condición en que se encuentran los distintos componentes del modelo siendo un valor cambiante en cada simulación. Las variables exógenas, que son independientes del modelo y describen el comportamiento o condiciones sobre los cuales los planificadores del sistema no pueden ejercer ninguna influencia directa. Los parámetros del modelo, son las variables que caracterizan a los objetos y las relaciones del modelo; también se pueden definir como aquellas propiedades que permanecerán invariables a lo largo de los cálculos matemáticos. Las variables de salida, representan la respuesta del sistema que pueden ser cantidades físicas, por ejemplo reboses, déficits mensuales, económicas, beneficios anuales o una variable en combinación de todas.

2.3.2. Modelos de Optimización en Sistemas Hídricos

Los modelos de optimización proporcionan un medio para reducir el número de alternativas que deben simularse en detalle. Estos modelos buscan el espacio posible de todos los valores de las variables de diseño e identifica un diseño óptimo con una política de explotación determinada. Una ventaja de estos modelos es de poder encontrar la sensibilidad de la solución óptima a los cambios en los parámetros del modelo.

Estos modelos describen la relación entre las variables de estado y los gastos o beneficios de cada alternativa en función de las variables de decisión. Uno de las limitaciones de estos modelos son las restricciones de las variables de estado de rango corto, pudiendo entonces no converger a una solución óptima. La optimización de los modelos se utiliza generalmente

para una evaluación preliminar y para identificar los datos importantes antes de una extensa recopilación de datos y de la modelación de distintas actividades del proceso.

Debido a que el problema es un problema multisectorial, uno de los temas más difícil de plantear es la definición de los objetivos, función relevante en la gestión de los recursos hídricos. Es por eso que siempre existen varios individuos y grupos de interés afectados por algún proyecto e involucrados en la toma de decisiones. Por otro lado, algunos objetivos son de difícil cuantificación y aquellos que pueden ser cuantificados frecuentemente están expresados en unidades no comparables entre sí.

Por tanto, es muy difícil obtener un plan de gestión óptimo que satisfaga todos los objetivos económicos, ambientales conflictivos entre sí. Sin embargo los responsables del análisis y la formulación del plan de gestión deben identificar planes que representen razonables acuerdos (negociaciones) entre aquellos intereses y metas conflictivas.

El modelo matemático de optimización se puede expresar de la siguiente forma general:

$$\text{Maximizar } Z(x) = (Z_1(x), Z_2(x), \dots, Z_n(x)), \text{ sujeto a } g_k(x) \leq 0, k = 1, \dots, m \quad (2.4)$$

Donde $Z(x)$ es el vector de las n funciones objetivo Z_i , donde dichas funciones objetivo pueden ser una combinación lineal o no lineal de indicadores de comportamiento del sistema, x es el vector de las variables de decisión, las funciones $g_k(x)$ son las restricciones que definen el espacio factible S .

En el manejo de Recursos Hídricos, es usual representar a las variables de decisión como las cantidades de agua asignadas para algún propósito o proyectos hidráulicos potenciales o también pueden ser parámetros introducidos en las reglas de operación de elementos de control y almacenamiento que se hayan elegido como estratégicos en la operación del sistema. Las restricciones usualmente están ligadas a capacidad de agua, restricciones ambientales, etc.

No existe una solución factible x que maximice simultáneamente todos los objetivos, ya que los objetivos pueden resultar mutuamente excluyentes. Entonces debe buscarse una solución satisfactoria y eficiente, que aproveche el máximo de los recursos, esto tal vez deba hacerse a expensas de otro. Por lo tanto, para la solución de este problema se requiere incorporar valoraciones objetivas y subjetivas, esta última expresadas mediante una estructura de preferencias del analista (ponderación de propósitos y ponderación de las medidas de evaluación de alternativas).

2.3.3. Criterios de Gestión en Recursos Hídricos

El manejo de los recursos hídricos tiene la necesidad de incluir criterios de gestión que tenga en cuenta un grado de anticipación a las acciones, tanto en la etapa de planificación como en la etapa de explotación del sistema. Es importante entonces, contar con reglas operativas que contemplen tanto las restricciones de descargas a los suministros, en el caso de una sequía hidrológica como en la época de avenida. Sin embargo, fijar reglas que se adapten a todos los escenarios de oferta y demanda de agua, implica establecer para cada uno de estos casos reglas específicas que indiquen por ejemplo cuándo comenzar a aplicar tal o cual medida de mitigación, el grado de las restricciones de uso del agua y el grado de prioridad de afectación de los usuarios, entre otros factores, lo cual obliga a discretizar el problema antes de modelarlo.

En periodos hidrológicos normales la regla de operación mayormente utilizada consiste en suministrar todo el volumen de agua demandado por el sistema mientras se disponga del recurso y de entregar solo el recurso disponible cuando es inferior a la demanda. Esta regla no contempla la no linealidad de las pérdidas, asociadas a los déficits en algunos sectores de usuarios. Por otro lado, en sistemas hídricos complejos, con más de un embalse, debe establecerse además, de qué manera se va a distribuir el recurso entre los elementos de almacenamiento, aumentando así, la dimensión del problema en el manejo del recurso hídrico.

Se han realizado esfuerzos para plantear políticas en sistemas de múltiples embalses, como cartas de maniobras operativas, para cada tipo de sistema (embalses en cadena o en serie) y cada tipo de propósito (control de crecidas, generación de energía, riego, agua potable, recreación, almacenamiento de energía) y estación o período (llenado o vaciado). Es así que Lund J. y Guzmán J. en 1999 [11], sintetiza en las Tablas N° 2.3 y 2.4, las reglas conceptuales básicas, para una conveniente operación de estos sistemas. Todas estas ideas pueden derivar en una ecuación matemática específica para cada propósito factible de optimización buscando maximizar o minimizar alguna función objetivo determinada.

Cabe señalar que las reglas de operación adecuadas para periodos hidrológicos normales, en general no serán las adecuadas para periodos hidrológicos extremos donde puede esperarse, por ejemplo, una crecida o una situación de sequía hidrológica prolongada. En estos casos, las reglas de operación deben modificarse no sólo durante este período sino con un cierto grado de anticipación, lo que obliga a realizar un análisis para horizontes de largo y mediano plazo, antes de definir conjuntos de reglas de manejo y planificación.

Tabla N° 2.3. Reglas generales para el manejo de embalses en serie.

Propósito	Estación/Periodo	
	Llenado	Vaciado
Uso Doméstico e Industrial	Llenar primero los embalses aguas arriba	Vaciar primero los embalses aguas abajo
Control de crecidas	Llenar primero los embalses aguas arriba	Vaciar primero los embalses aguas abajo
Almacenamiento de energía	Llenar primero los embalses aguas arriba	Vaciar primero los embalses aguas abajo
Producción de hidroenergía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía
Recreación		Compensar la explotación marginal de la recreación

Tabla N° 2.4. Reglas generales para el manejo de embalses en paralelo.

Propósito	Estación/Periodo	
	Llenado	Vaciado
Uso Doméstico e Industrial	Compensar la probabilidad de derrames estacionales entre los embalses	Compensar la probabilidad de vaciado entre los embalses
Control de crecidas	Dejar mas espacio de almacenamiento en los embalses sometidos a crecidas	No es aplicable
Almacenamiento de energía	Compensar el Valor Esperado de la energía de los derrames estacionales entre los embalses	Para el último paso de tiempo, compensar el Valor Esperado de la energía de los derrames de la estación de llenado entre los embalses
Calidad del Agua	Compensar el Valor Esperado de la calidad del agua estacional marginal entre los embalses	Para el último paso de tiempo, compensar el Valor Esperado de la energía de los derrames de la estación de llenado entre los embalses
Producción de hidroenergía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía
Recreación	Compensar la explotación marginal de la recreación de almacenamientos adicionales entre los embalses	Compensar la explotación marginal de la recreación de almacenamientos adicionales entre los embalses

Los sistemas hídricos complejos están formados por múltiples partes o subsistemas. Todo sistema a su vez es parte de un sistema mayor, en este caso, el sistema hídrico multiobjetivo está inmerso en una cuenca hidrográfica la cual es su sistema mayor. Todo análisis de

sistemas debe tomar en cuenta cual es la posición del subsistema dentro del sistema que lo incluye, cuáles son las partes que lo forman y las interacciones entre las mismas.

La operación conjunta de un sistema depende de la coordinación entre los subsistemas. La coordinación entre subsistemas se basa en la información que recibe la unidad de control. La forma de control y la naturaleza de la información que debe manejarse para poder controlar y coordinar entre sí los diversos subsistemas de una estructura jerárquica dependen de los objetivos, de las funciones de control y de las restricciones del sistema. Una forma de control es a través de las pirámides de jerarquía como se muestra en la Figura N° 2.2.



Figura N° 2.2. Pirámides de jerarquía para un sistema de control

Como puede observarse a medida que se avanza hacia la cúspide, las variables físicas disminuyen y aumenta la importancia de las variables económicas en el proceso de toma de decisiones. Un ejemplo concreto de ello se da en las centrales de generación hidroeléctrica cuyo control mediante reguladores se basa, exclusivamente en variables físicas, mientras que a nivel de producción, el despacho económico se realiza en función de variables físicas y económicas.

Por tanto, el problema de manejo del agua, dependerá del nivel jerárquico al que se plantee el sistema y subsistemas de estudio. En general los problemas a resolver se encuentran en un punto intermedio entre la base y la cima de la pirámide, es decir son problemas en que intervienen tanto variables físicas como económicas y la toma de decisiones incluye procesos de control de naturaleza tanto determinística como estocástica.

2.3.4. Métodos de Optimización en Sistemas de Recursos Hídricos

En el manejo de los recursos hídricos constantemente se analiza alternativas para buscar la solución óptima. La simulación es una técnica que analiza alternativas con la ayuda de una gran cantidad de información y de horas de computadora, pudiendo encontrar una solución

que puede ser la apropiada, pero no encuentra directamente la solución óptima. Entre los métodos de optimización encontramos la programación lineal y dinámica.

a) Programación Lineal

El problema de la resolución de un sistema lineal de inecuaciones se remonta, desde Fourier, de quien años después nace el método de eliminación de Fourier-Motzkin. La programación lineal se plantea como un modelo matemático desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial para planificar los gastos y los retornos, a fin de reducir los costos al ejército y aumentar las pérdidas del enemigo. Se mantuvo en secreto hasta 1947. En la post-guerra, muchas industrias lo usaron en su planificación diaria.

Los fundadores de la técnica son George Dantzig, quien publicó el algoritmo Simplex, en 1947, John Von Neumann, que desarrolló la teoría de la dualidad en el mismo año, y Leonid Kantorovich, un matemático ruso, que utiliza técnicas similares en la economía antes de Dantzig y ganó el premio Nobel en economía en 1975. Leonid Khachiyan en 1979 fue el primero en demostrar que el problema de la programación lineal se solucionaba en tiempo polinomial, sin embargo, el mejor avance en los principios teóricos y prácticos en el campo se produjo en 1984, cuando Narendra Karmarkar introduce un nuevo método del punto interior para resolver problemas de programación lineal.

La programación lineal permite formular un amplio número de problemas relacionados con el control, explotación, planificación, economía y la regulación de energía.

Un problema de programación lineal es un problema de minimización o maximización de una función lineal con restricciones lineales de igualdad y desigualdad. El problema de programación lineal puede ser formulado como:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar :} \quad & Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \\
 \text{Sujeto a :} \quad & \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\
 & x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Donde Z se denomina función objetivo o función criterio, los coeficientes c_j se llaman coeficientes de beneficio o coeficientes de costo, las variables x_j son llamadas variables de decisión, los coeficientes a_{ij} son números reales conocidos y se les denomina coeficientes

tecnológicos, b_i son números conocidos y se les denomina vector de disponibilidades, y las restricciones $x_j \geq 0$ se llaman restricciones de no negatividad.

Al conjunto de valores de x_j que satisfacen simultáneamente todas las restricciones se le denomina región factible. La solución óptima es el punto de la región factible que hace máxima o mínima la función objetivo.

b) Programación Dinámica

La programación dinámica es una técnica de optimización enumerativa aplicable a problemas con restricciones y funciones objetivo que pueden ser no lineales y regiones factibles no convexas. Se aplica a problemas que pueden descomponerse en etapas a lo largo del tiempo, pero también puede emplearse en problemas no secuenciales o con estructura en serie (Gerez V. y Grijalva, M., 1987).

La programación dinámica permite resolver problemas que se caracterizan por el hecho de que una solución tomada en el tiempo o etapa presente afecta el comportamiento del proceso en una etapa o tiempo futuro, por lo cual la solución al problema es una secuencia de decisiones que comprende la duración total del proceso y no una sola decisión establecida en el tiempo presente.

Hay dos condiciones que se deben cumplir antes de comenzar a pensar en un problema de optimización usando programación dinámica. Sub-estructura óptima: cuando la solución óptima a un problema se puede componer a partir de soluciones óptimas de sus sub-problemas; Superposición de problemas: el cálculo de la solución óptima implica resolver muchas veces un mismo sub-problema.

El problema global (multietapa) se resuelve mediante un proceso recursivo que trata las etapas una a una. Es posible avanzar bien hacia delante ó bien hacia atrás.

El principio de optimalidad de Bellman, en el que se basa la programación dinámica, establece que "cualquier decisión multietapa óptima tiene la propiedad de que cualquiera que sea la situación actual (un estado en una determinada etapa) dentro de esa decisión multietapa óptima, el resto de las decisiones futuras ha de constituir una decisión multietapa óptima con respecto a la situación actual". Es decir dada una secuencia óptima de decisiones, toda sub-secuencia de ella es, a su vez, óptima.

A continuación, se formula el problema de programación dinámica.

$$X_{k+1} = f_k(X_k, U_k, W_k) \quad (2.6)$$

Se tiene un sistema que evoluciona de forma discreta con el tiempo, con un horizonte finito de N etapas, donde:

k : Índice de cada etapa, $k = 0, 1, \dots, N-1$

x_k : Estado del sistema en la etapa k .

u_k : Decisión tomada en el periodo k y cuya influencia se nota en el periodo $k+1$.

w_k : Perturbación sobre el sistema en el periodo k .

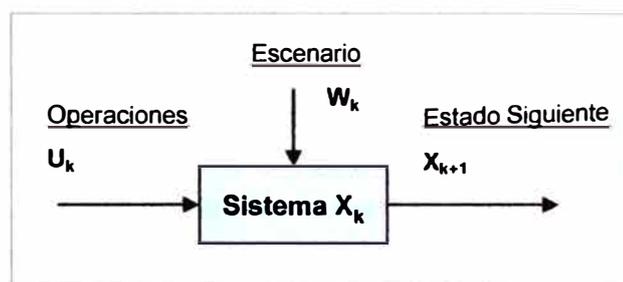


Figura N° 2.3. Sistema de programación dinámica.

El estado siguiente a cada etapa depende del estado actual del sistema, de las decisiones tomadas en esa etapa y de las perturbaciones exteriores.

CAPITULO III

GESTIÓN Y MANEJO DE CUENCAS EN EL PERÚ

3.1. Antecedentes

Desde la aparición del hombre, las civilizaciones pudieron crecer y sobresalir donde la tierra era más prospera para la agricultura. Es así que en los lugares donde existían suelos productivos y agua en calidad, se lograba tener un mayor desarrollo productivo que en otras. En el Perú la problemática sobre el uso sostenible de los recursos naturales es tan antigua como las civilizaciones que lo han habitado. Los logros realizados en el Perú antiguo todavía se muestran por todo el país. La historia nos presenta a culturas de nuestro medio con estructuras sociales orientadas al manejo racional de los recursos naturales.

En la época incaica, se otorgaba especial importancia al manejo y protección de las partes altas de las cuencas y al cultivo del maíz. Esta concepción hizo que en estas zonas se construyeran varias hectáreas con andenes y otras prácticas conservacionistas, gran parte de ellas dedicadas al cultivo del maíz.

El desarrollo de la agricultura en el Perú tiene una fuerte correlación con los avances en el manejo del agua para riego. Los antiguos peruanos encararon seriamente el “problema del agua de riego” y probablemente dio inicio a importantes cambios en la agricultura y la sociedad, algunos de los cuales aún hoy tienen vigencia ya que una parte de la infraestructura de riego existente tiene antecedentes prehispánicos. Se afirma asimismo que dichas estructuras económicas y sociales estaban sustentadas por una ideología que tenía como valores morales, religiosos y artísticos a los recursos naturales [12].

Al llegar la conquista, la colonia quebró este sistema sociopolítico, al anteponerle un orden social totalmente diferente. Los españoles no solo abandonaron la preocupación por la construcción de nueva infraestructura agraria, sino que además quebraron bruscamente la base ideológica que sustentaba el buen cuidado de los recursos naturales.

Actualmente se está difundiendo una cultura integral en armonía con la naturaleza donde la sociedad impulsa un sistema de gestión en forma integrada, concertada y eficiente.

3.2. Generalidades

Gestión y Manejo de cuencas son dos términos que generalmente han traído a confusión por tener significados diferentes pero a la vez compatibles y complementarios.

Manejo de Cuencas se refiere al uso racional de los recursos naturales, adoptando medidas que garanticen su sostenibilidad en el tiempo y contribuyendo al mismo tiempo en el bienestar del hombre. Mientras que Gestión de Cuencas se refiere a la forma como un grupo de personas administran los recursos humanos y naturales logrando el consenso entre ellos.

La cuenca en forma independiente o interconectada con otras, es la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada de los recursos hídricos porque cumplen una función importante dentro del ciclo hidrológico, al lograr captar y concentrar la oferta del agua que proviene de las precipitaciones. Sin embargo, debido a que las jurisdicciones político – administrativas (países, estados, provincias, municipios o regiones) no coinciden con los límites territoriales de las cuencas, muchas de las decisiones afectan al ciclo hidrológico, el aprovechamiento del agua y a los habitantes de una cuenca, el cual no considera las interrelaciones de este sistema integrado, como tampoco el efecto que tiene el drenaje del agua de la cuenca en las franjas costeras y el mar [13].

El agua utilizada que no se devuelve en forma inmediata al ciclo del agua se llama “uso consuntivo”. Por ejemplo, el riego es un uso consuntivo, mientras que la generación de energía eléctrica mediante el agua turbinada de un río y si la descarga es en el mismo río es un “uso no consuntivo”. En agricultura, el uso consuntivo es el agua que se evapora del suelo, el agua que transpiran las plantas y el agua que constituye el tejido de las plantas. Es la cantidad de agua que debe aplicarse a un cultivo para que económicamente sea rentable.

En los usos llamados “consuntivos” como el riego y abastecimiento de agua potable, sólo una pequeña parte del agua inicialmente extraída de una corriente se consume. El agua que no se consume, es decir, que no se evapora o que no es transferida a otra cuenca retorna a la corriente aguas abajo, ya sea en forma directa, mediante escorrentía superficial, o en forma indirecta, mediante el agua subterránea, y en consecuencia puede aprovecharse reiteradamente.

En cuanto a los usos “no consuntivos” como la generación hidroeléctrica, recreación y acuicultura, aunque usualmente no existe rivalidad entre los usuarios por la cantidad de agua utilizada, de igual forma se da un alto grado de interrelación, interdependencia y afectación recíproca entre usos en el propio caudal.

A los usuarios ubicados aguas arriba poco les interesan los efectos de sus acciones y decisiones para los usos de los usuarios ubicados aguas abajo, por lo que suelen aprovechar su ubicación privilegiada. Los usuarios aguas abajo no tienen posibilidad de controlarlos sin una intervención reguladora externa. Este hecho limita severamente las posibilidades de alcanzar un aprovechamiento del recurso que sea económicamente óptimo, socialmente justo y ambientalmente sustentable, por lo que se justifica la intervención del Estado.

Por todo lo mencionado, la cuenca se convierte en la unidad territorial apropiada para el análisis y para la toma de decisiones de gestión del agua, especialmente cuando su uso es múltiple y es motivo de conflictos por su asignación y contaminación.

3.3. Gestión Integrada del Agua

La Asociación Mundial para el Agua (Global Water Partnership) define la gestión integrada del agua como un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar socioeconómico de manera equitativa sin comprometer los ecosistemas vitales. Por otro lado, un estudio reciente del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) centra la atención en un aspecto ligeramente diferente y dice que la gestión integrada del agua implica tomar decisiones y manejar los recursos hídricos para varios usos de forma tal que se consideren las necesidades y deseos de diferentes usuarios y partes interesadas. Según este estudio, la gestión integrada del agua comprende la gestión del agua superficial y subterránea en un sentido cualitativo, cuantitativo y ecológico desde una perspectiva multidisciplinaria y centrada en las necesidades y requerimientos de la sociedad en materia de agua.

Con estas y otras definiciones, se puede llegar a la conclusión de que la gestión integrada del agua puede entenderse como al menos cinco formas distintas de integración [13]:

- La integración de intereses de los diversos usos y usuarios de agua y la sociedad en su conjunto, con el objetivo de reducir los conflictos entre los que dependen y compiten por este escaso y vulnerable recurso;
- La integración de todos los aspectos del agua que tengan influencia en sus usos y usuarios (cantidad, calidad y tiempo de ocurrencia), y de la gestión de la oferta con la gestión de la demanda;

- La integración de los diferentes componentes del agua o de los diferentes fases del ciclo hidrológico (por ejemplo, la integración entre la gestión del agua superficial y del agua subterránea);
- La integración de la gestión del agua y de la gestión de la tierra y otros recursos naturales y ecosistemas relacionados; y
- La integración de la gestión del agua en el desarrollo económico, social y ambiental.

Las políticas para utilizar el territorio de una cuenca como base para la gestión del agua han tenido diferentes enfoques y una desigual evolución en los países de América Latina y el Caribe. Las razones principales que consideran a la cuenca como unidad territorial para la gestión integrada del agua son [13]:

- Las características físicas del agua generan un grado extremadamente alto de interrelación e interdependencia (externalidades o efectos externos) entre los usos y usuarios de agua en una cuenca.
- Las cuencas constituyen un área donde interactúan en forma permanente y dinámico, el agua con los sistemas físicos (recursos naturales) y bióticos (flora y fauna).

3.3.1. Cuenca Hidrográfica

Hoy en día existen diversas definiciones de cuenca hidrográfica, la más común señala que “Es el área natural o unidad de territorio, delimitada por una división topográfica (divortium aquarum), que capta la precipitación y drena el agua de escorrentía hasta un colector común, denominado río principal”.

Es importante indicar que la cuenca hidrográfica no es un simple plano de dos dimensiones, sino un espacio tridimensional limitado hacia arriba por la interfase del horizonte superior de sus suelos, sus superficies libres de agua y la parte aérea de su vegetación con la atmósfera; y hacia abajo, por los estratos del subsuelo que incluyen las aguas subterráneas, el regolith, es decir, material en partículas y fraccionado del suelo y la roca subyacente, los que pueden ser afectados por los procesos naturales o antrópicos originados por la acción del hombre que tienen lugar en la cuenca [14].

El agua en la cuenca conecta e integra sus partes, los cuales están ligados mutuamente conformando una unidad. Esta figura se da claramente en las cuencas hidrográficas, según su arreglo jerárquico como cuencas, subcuencas y microcuencas.

Tabla N° 3.1. Rango de área por unidad hidrológica

Unidad Hidrológica	Área (Ha)
Cuenca	50,000 - 80,000
Subcuenca	5,000 - 8,000
Microcuenca	< 5,000

Un tema que aún falta esclarecer son los conceptos de cuenca, subcuenca y microcuenca; que por razones prácticas se asocian en función a su rango de área, como se aprecia en la Tabla N° 3.1. Los rangos de área están en función del grado de ramificación de los cursos de agua. El grado u orden de un curso de agua o río se inicia desde el cauce más pequeño teniendo como límites el "divortium aquarum" [10].

Los componentes principales que conforman una cuenca son los elementos naturales y los de generación antrópica. Dentro de los elementos naturales tenemos a la flora, fauna, agua, suelo, aire, minerales y clima. Mientras que los elementos de generación antrópica o generados por el hombre, pueden ser de carácter socioeconómico y jurídico-institucional. Entre los primeros tenemos la tecnología, la organización social, la cultura y las tradiciones, la calidad de vida y la infraestructura desarrollada como los reservorios, canales de riego, cultivos, etc. Entre los elementos jurídico-institucionales tenemos las políticas, las leyes, la administración de los recursos y las instituciones involucradas en la cuenca.

Finalmente cabe señalar que un conjunto de microcuencas constituye una subcuenca y un conjunto de subcuencas forman una cuenca. Mientras que un conjunto de cuencas conforma una hoya y un conjunto de hoyas forma una vertiente.

3.3.2. Gestión de Cuencas

Es la dirección de procesos como la programación, coordinación, organización, legislación, administración y ejecución del manejo de las cuencas por parte de los diferentes actores que operan los recursos naturales de una cuenca.

En general, la estadística de las entidades de cuenca revela que aún cuando se hayan creado bajo un amparo legal, sus posibilidades de permanencia no están garantizadas. Muchas de estas entidades han desaparecido o no han logrado avanzar en términos de gestión integrada del agua ya sea por falta de apoyo del gobierno, por tiempo insuficiente para consolidarse, base legal no adecuada, por haber sido utilizadas con fines políticos, entre muchos otros factores que dificultan su permanencia.

Más aún a pesar de todos estos obstáculos, se acrecienta el interés en crear organismos de cuenca para llegar establecer una gestión integrada del agua. Las autoridades ambientales y defensores del medio ambiente han encontrado a su vez que la cuenca es un posible punto de partida para coordinar acciones tendientes a la gestión ambiental sobre todo si ya existen organizaciones de gestión del agua a nivel de cuencas.

Las etapas en un proceso de gestión de cuencas son [13]:

- La etapa previa: estudios, formulación de planes y proyectos.
- La etapa intermedia: etapa de inversión para la habilitación de la cuenca con fines de aprovechamiento de sus recursos naturales. Aquí se habla de los términos “river basin development” o “water resources development” que se traduce usualmente como “desarrollo de cuencas” o “desarrollo de recursos hídricos”.
- La etapa permanente: etapa de operación y mantenimiento de las obras construidas y gestión y conservación de los recursos naturales. Aquí se habla de los términos “water resources management” como “gestión de los recursos hídricos” y “watershed management” como “manejo de cuencas”.

Tabla N° 3.2. Modelo de objetivos y etapas en la gestión de cuencas

Etapas de gestión	Objetivos de gestión de cuencas			
	Para el aprovechamiento y manejo integrado	Para aprovechar y manejar todos los recursos naturales.	Para aprovechar y manejar solo el agua	
			Multisectorial	Sectorial
	(a)	(b)	(c)	(d)
1. Previa	Estudios, planes y proyectos (ordenamiento de cuencas)			
2. Intermedia (inversión)	"River Basin Development" (desarrollo integrado de cuencas o desarrollo regional)	"Natural Resources Development" (desarrollo o aprovechamiento de recursos naturales)	"Water Resources Development" (desarrollo o aprovechamiento de recursos hídricos)	"Water Resources Development" (agua potable y alcantarillado, riego y drenaje, hidroenergía)
3. Permanente (operación, mantenimiento, manejo y conservación)	"Environmental Management" (gestión ambiental)	"Natural Resources Management" (gestión o manejo de recursos naturales)	"Water Resources Management" (gestión o administración del agua)	"Water Resources Management" (administración de agua potable, riego y drenaje)
		"Watershed Management" (Manejo u ordenación de cuencas)		

Fuente: A. Dourojeanni - CEPAL (1994)

Los recursos naturales considerados en el proceso de gestión de una cuenca son:

- El primer grupo (a): Cubre todos los recursos naturales e infraestructura en una cuenca.

- El segundo grupo (b): Cubre todos los recursos naturales presentes en una cuenca.
- El tercer grupo (c): Considera el uso múltiple del agua.
- El cuarto grupo (d): Considera el uso sectorial del agua.

En la Tabla N° 3.2 se observa que el tipo de gestión de cuencas más completo es la columna (a) conocido en inglés como “river basin development” (etapa intermedia) y “environmental management” (etapa permanente). Estas etapas equivalen a aplicar técnicas de desarrollo regional mediante proyectos integrados de inversión a nivel de cuencas, esto tuvo gran auge en los países de la región a fines de los años de 1940, a raíz del éxito alcanzado por la Tennessee Valley Authority (TVA), creada en 1933 en los Estados Unidos de Norteamérica. Este modelo de gestión en el ámbito de cuencas se conoce como “desarrollo integral de cuencas”. El proceso se inició con actividades aisladas e irregulares para mitigar los efectos de inundaciones y sobre todo para generar energía hidroeléctrica sin considerar la interdependencia entre los usos del agua, aún cuando la cuenca era tomada como base de trabajo. Además, se puso mucho énfasis en las tareas de la construcción y operación de obras hidráulicas sectoriales, sin prestar mayor atención ni a la gestión del agua ni a la protección de sus cuencas de captación.

3.3.3. Manejo de Cuencas

El concepto original de manejo de cuencas (“watershed management”) en el sentido de “manipularla” para regular la descarga del agua que proviene de la misma, se encuentran en las escuelas forestales de los Estados Unidos de Norteamérica. En algunos casos se busca convertir los suelos en esponjas absorbentes de agua y así regular la descarga de agua en cantidad, calidad y tiempo retardando la descarga superficial y aumentando el flujo base. En otros casos se busca controlar la deposición de nieve en zonas sombreadas para que se derrita más lentamente, siempre buscando retardar y reducir la escorrentía superficial y aumentar la filtración. Algunos proyectos de manejo de cuencas también podrían tener el fin contrario al anterior, es decir buscar que el agua no se filtre para poder captarla. Para captar agua en zonas con mucha filtración se impermeabiliza la superficie de una cuenca para almacenar agua en los reservorios [13].

En todos los casos estos objetivos se orientan a usar la cuenca como captadora (“catchment area”) de agua para diferentes fines, principalmente para consumo humano (cuencas municipales) y para reducir el impacto de la escorrentía protegiendo así zonas vulnerables cerca de pendientes o cauces.

Institucionalmente, las actividades de manejo de cuencas no se realizan bajo estructuras administrativas claramente definidas. En algunos países se encuentran bajo el mandato de programas de medio ambiente; en otros, bajo esquemas de programas forestales; en otros, bajo sistemas de manejo de recursos naturales; y en otros, bajo programas de desarrollo local o comunal, por citar sólo algunas de las múltiples variantes que tiene la institucionalidad a cargo de conducir programas llamados todos de “manejo de cuencas”.

3.4. Marco Regulatorio en el Perú

Uno de los orígenes más antiguos en planificar el desarrollo de cuencas hidrográficas se inicia con la creación de la Autoridad Autónoma del Valle del Tennessee en Estados Unidos en 1933.

En el Perú el primer programa de Manejo de Cuencas, fue organizado por el Ministerio de Agricultura en 1974, pero es en 1980 cuando se inician las acciones con el Programa Nacional de Conservación de Suelos y Agua en Cuencas Hidrográficas (PRONAMACHS).

En esos tiempos, la norma más importante de la legislación peruana en materia de recursos hídricos era la Ley general de Aguas, Ley N° 17752 promulgada en julio de 1969, en los inicios del gobierno militar. Concebida como un complemento de la Ley de Reforma Agraria, la Ley General de Aguas estableció como norma fundamental que todas las aguas, sin excepción y cualquiera fuera su estado físico y ubicación, pertenecen al Estado.

Como consecuencia de ello se creó una Autoridad de Aguas, alrededor de una Dirección General y un Administrador Técnico por cada Distrito que facilitarían el acceso a los particulares a los diversos usos, con autoridad de sancionar en caso de incumplimiento de obligaciones y se encargarían del mantenimiento de la infraestructura hidráulica entre otras cosas.

El sistema de asignación del agua empezó a tener serios problemas en el Perú desde inicios de la década de 1980, después de 10 años de aprobada la ley de aguas. El sector donde se evidenciaron mayores problemas fue el sector agrario, el cual alberga a millones de agricultores usuarios del recurso. En efecto, el modelo administrativo creado por la ley de 1969 fue relativamente viable en la agricultura en la medida que existían un número relativamente pequeño de unidades productivas (cooperativas y sociedades agrarias de interés social creadas por la reforma agraria) a las cuales se les debía otorgar licencias o permisos. Sin embargo, a principios de la década de 1980, se inició un rápido y masivo proceso de disolución y fragmentación de estas unidades, pasándose a una situación con

cientos de miles de unidades productivas individuales que requerían licencias y frente a las cuales la administración no pudo responder.

De otro lado, el sistema de tarifas creado por la ley nunca funcionó realmente como se había previsto y durante la mayor parte de la década de 1970 fue el Estado el que subsidió la operación de todo el sistema técnico y administrativo, especialmente asociado al uso agrario. El problema ocurrió cuando se presentó la crisis fiscal y de financiamiento externo desde mediados de la década de los años 1970. Toda la década de los años 1980 estaría marcada por muy severas restricciones fiscales que implicarían un total abandono del financiamiento estatal del aparato administrativo encargado del agua. Frente a esto, una solución sería el financiamiento por parte de los propios usuarios, quienes se rehusaban a esta opción.

En general, a fines de 1980 la situación en el manejo del agua era totalmente caótica. A través de un dispositivo legal específico (D.S. 037-89-AG), y como parte de una descentralización administrativa, el gobierno inició un cambio muy importante en la normatividad vigente, decidió delegar funciones estatales de administración, mantenimiento y el cobro de tarifas a las organizaciones de usuarios (básicamente regantes). Un posterior reglamento de tarifas aprobado a principios de 1990 estableció un componente en las tarifas, como, Ingreso Junta de Usuarios, para que estas organizaciones financien sus actividades bajo ciertos requisitos mínimos.

Sin experiencia y con pocos recursos, estas organizaciones no pudieron enfrentar efectivamente los complejos problemas existentes de manera inmediata. En muchos casos, las tarifas que establecieron los regantes eran inferiores a las tarifas previas y se mantuvieron fijas por varios años (pese a que el reglamento establecía un mecanismo automático de reajuste respecto a la Unidad Impositiva Tributaria).

Este conjunto de cambios se profundizaría durante los primeros años de la década de 1990, cuando se trasladó la responsabilidad de otorgar licencias de agua a los Administradores Técnicos de Agua, quienes tenían muy pocos recursos y capacidades para cumplir con las funciones asignadas.

Esta organización se vio alterada en 1991 en el que se crearon las Autoridades Autónomas de las Cuencas Hidrográficas y a través de la reglamentación de la ley, se introdujeron las organizaciones de usuarios a las cuales se les ha ido transfiriendo mayores funciones y responsabilidades.

Bajo este esquema en cada cuenca debería existir una Autoridad de Agua (Administrador Técnico de Riego) quien sería el encargado de las licencias y derechos de uso con la

obligación de programar las descargas anuales y las entregas a los usuarios en función de la disponibilidad del recurso. También debería velar por el cumplimiento de esas entregas y sancionar a aquellos que las incumplen y restablecer los derechos.

Este desenlace afectó a los usos no agrarios, que se sintieron aún más marginados del sistema de acceso al agua, al tener que depender de organizaciones de usuarios con presencia masiva, como los regantes. Esta situación llevó a que sectores no agrarios empiecen a impulsar normas paralelas y en muchos casos contrarias a la ley de aguas.

El sector saneamiento, por ejemplo, consiguió normas específicas para el manejo del agua de la capital metropolitana en donde la empresa estatal (SEDAPAL) adquirió funciones similares a las de una autoridad de aguas. El sector turismo pasó a otorgar directamente las licencias para aguas minero-medicinales, mientras en el sector energético el Ministerio de Energía y Minas empezó a cobrar las tarifas de agua por uso energético. En general, el sistema administrativo centralizado en el Ministerio de Agricultura creado por la ley de 1969 empezó a resquebrajarse tanto a nivel sectorial como a nivel territorial, en un contexto de mayor presión de los usuarios de uso agrario y de las empresas y entidades públicas asociadas a otros usos del agua.

Así, durante toda la década de 1990, hubo diversos intentos por cambiar la legislación de aguas en el Perú. El sistema de asignación creado por la ley de 1969 se presentaba entonces como ineficaz para promover objetivos sociales y económicos, y se pensaba que la adopción del "modelo chileno" podría revertir esta situación. Más esto no sucedió así debido al rechazo de la reforma por amplios sectores de la sociedad y especialmente por los agricultores, los mayores consumidores del recurso hídrico.

3.4.1. Reformas en la Legislación del Agua

En el Perú desde 1990 se inicia un cambio político y económico muy importante por la liberalización económica. A partir del año 1991 se presenta una serie de medidas drásticas de liberalización económica y privatización de los activos estatales, con el principal objetivo de promover la inversión privada. Luego, en los diversos sectores se generaron medidas específicas orientadas a promover la inversión, uno de ellos fue el sector agrario, en donde se aprobó un dispositivo legal (D.L. 653, Ley de Promoción de las Inversiones en el Sector Público Agrario) que introdujo algunos incentivos para la inversión privada en la extracción de agua subterránea, incumpliendo de esta manera con la ley general de 1969. Es en esta

etapa que el gobierno empiece a plantear la necesidad de aprobar una nueva ley de aguas que sea compatible con la liberalización económica en marcha.

Así hacia fines de 1991 el Ministerio de Agricultura decide formular una propuesta de ley de aguas muy parecida a la de Chile, que en 1981 había aprobado un código de aguas que privatizaba los derechos e introducía plenamente la operación del mercado. Esta propuesta inicial fue complementada con una serie de disposiciones para mantener atribuciones burocráticas dentro del ámbito del sector. Es por esto que la norma propuesta apareció como una mezcla de liberalización pero de burocratización en la parte administrativa.

Los problemas de esta primera propuesta eran por ser incompatible con la Constitución vigente (de 1979) que declaraba que los recursos naturales son Patrimonio de la Nación, y por ende el agua, no puede ser privatizada. Además, en esa misma época se empezaron hacer cuestionamientos a la legislación chilena.

Adicionalmente a lo señalado, la propuesta inicial no fue consultada ni discutida con diversos actores importantes tanto al interior del gobierno como entre los usuarios, quienes rechazaron abiertamente el proyecto, especialmente los agricultores. El principal argumento de los agricultores fue el temor a la operación de un mercado de aguas, que era visto como una posibilidad de perder acceso al recurso ante intereses económicos. Pero también se opusieron grupos ambientalistas y administradores de agua al proyecto, que veían con preocupación el debilitamiento normativo de las funciones reguladoras del Estado en materia de aguas.

Luego, entre los años 1993 y 1994 se inicia un nuevo esfuerzo por aprobar una ley de aguas, buscando esta vez superar algunas de las limitaciones del intento previo. En 1993 se aprobó una nueva Constitución que mantiene la figura de los recursos naturales como patrimonio de la nación, aunque en este caso indicando que estos serán otorgados bajo la modalidad de concesión. Además la Constitución de 1993 señaló que el Congreso debía promulgar una Ley Orgánica de Recursos Naturales previo a la aprobación de leyes para recursos específicos como el agua.

Con este nuevo escenario, el Ministerio de Agricultura, a su vez presionado por el Ministerio de Economía y Finanzas, decide relanzar su propuesta de ley de aguas pero esta vez con algunas modificaciones. Por ejemplo, se decidió incluir un impuesto a los derechos de manera de evitar la especulación. Igualmente, se incorporaron algunas nociones de manejo del agua a través de cuencas y se consideraron algunas limitaciones a la propiedad del agua en las fuentes naturales [3].

Este nuevo proyecto tuvo muchas posibilidades de ser aprobado, especialmente en el periodo 1995-1996. No obstante, en esta etapa aparecieron una serie de adversarios al proyecto del Ministerio de Agricultura dentro del propio gobierno, especialmente en el área de agua potable y saneamiento, que veía con preocupación que el proyecto eliminara las prioridades previamente establecidas para el consumo de agua potable. Finalmente, el proyecto no fue aprobado y ante el cambio de ministro en el sector agricultura se generaría un nuevo escenario.

Entre los años 1996 y 1998 a raíz de estos antecedentes, el tercer intento por aprobar una nueva ley de aguas en el Perú se basó en la conformación de una comisión multisectorial al interior del gobierno con la participación de los principales sectores interesados, agricultura, agua y saneamiento, energía y minas, economía y finanzas, entre otros. En esta etapa se iría perfilando una propuesta más integral para la reforma de la legislación, en donde se eliminaría la figura de la privatización de los derechos de agua y se iría a una visión multisectorial del agua, generando una autoridad multisectorial en lugar de la tradicional autoridad dentro del sector agricultura. Este tercer intento no llegaría a consolidarse finalmente ante la pérdida de interés en el tema en los sectores de agricultura y de economía y finanzas. El gobierno decidió implementar, a través de Ministerio de Agricultura, un Plan Piloto de funcionamiento del mercado de aguas en tres valles específicos del norte, centro y sur. Este Plan Piloto no fue finalmente aplicado y esto sirvió como pretexto para dejar de discutir el tema en las instancias gubernamentales [3].

En 1997 se aprobó finalmente la Ley Orgánica para el Manejo Sostenible de los Recursos Naturales, que otorga el marco general en el que se deben generar leyes específicas como la del agua.

Los años 1999 y 2000 estarían marcados por una complicada situación política y el país se había polarizado seriamente ante una segunda reelección del presidente Fujimori. En estos años no hubo mayores iniciativas relevantes en materia de legislación de aguas.

Hacia fines del año 2000 se produce la caída del gobierno de Fujimori e ingresa un gobierno de transición a cargo del Dr. Valentín Paniagua que duraría hasta mediados del año 2001 cuando asume el Dr. Alejandro Toledo luego de la realización de elecciones generales. Durante el gobierno de transición hubo un intento de generar una nueva ley de aguas promovido desde el sector agricultura, con un proyecto de ley que fue pre-publicado y discutido por la opinión pública durante varios meses. Este proyecto tuvo algunos avances

interesantes, pero igualmente, en el ámbito de la definición de los derechos de agua, el proyecto tuvo ambigüedades que no llegaban a aclarar el estatus jurídico del recurso.

El 2002 mediante R.S.122-2002-PCM el gobierno del Dr. Alejandro Toledo creó la Comisión Multisectorial para redactar un proyecto de nueva Ley de Aguas. La Comisión incorporó a miembros de todos los Ministerios y Organismos Públicos relacionados al agua, así como a los usuarios privados de los sectores agrario, minero, industrial y urbano que se instaló en enero de 2003; el documento preliminar de Proyecto de Ley de Aguas se trabajó durante 4 meses y que luego fuera prepublicado en mayo de 2003 para someterse al debate público.

El proyecto preparado por la Comisión aceptó el principio de que el agua es una sola y que su aprovechamiento múltiple requiere de una institucionalidad equilibrada y con una única autoridad técnico-normativa para hacer cumplir la Ley y velar por el recurso en sus fuentes naturales. El proyecto también formuló una forma novedosa de articulación de la institucionalidad del agua dentro del proceso de regionalización en marcha. Se crearían los Consejos de Cuenca a nivel regional y multiregional (dependiendo de las características objetivas de las cuencas), como instancias básicas para la gestión del recurso.

Sin embargo, la propuesta normativa que generó reacciones adversas, especialmente en el sector agricultura, fue el sistema de derechos de aguas en base a la figura de la "concesión" sobre el recurso natural agua, tal como lo señala la Ley Orgánica para el Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales y la propia Constitución vigente. Las concesiones de aguas otorgarían a sus titulares un derecho de beneficio del recurso bajo condiciones establecidas, más no otorgarían un derecho de dominio (propiedad) sobre el agua.

Igualmente, acorde con los lineamientos de la Ley Orgánica, la propuesta consideró que las concesiones de aguas sí podían ser intercambiadas por sus titulares siempre y cuando se respeten las condiciones originales de otorgamiento (es decir, siempre y cuando no se cambien atributos importantes de la propia concesión). Esto en la práctica equivalía a permitir la operación de un mercado de derechos de agua, aunque en condiciones distintas a la legislación chilena que era más liberal, es decir, un mercado podría operar pero bajo condiciones establecidas en el otorgamiento de las concesiones respectivas y sin perder el dominio público sobre el recurso.

3.4.2. Situación Actual

El 28 de junio de 2008 se publicó el Decreto Legislativo 1081 que crea el Sistema Nacional de Recursos Hídricos, luego el 25 de septiembre del mismo año con el Decreto Supremo N°

021-2008-AG se reglamentó dicha norma, aclarando las dudas que inicialmente surgieron en las organizaciones de usuarios, en el sentido de que no hay ningún dispositivo que promueva la privatización del recurso hídrico tal como lo señalaba la Junta de Usuarios de Riego. Finalmente, el 31 de marzo de 2009 se publicó la Ley de Recursos Hídricos que tiene como finalidad según su artículo 2: "... regular el uso y gestión integrada del agua, la actuación del Estado y los particulares en dicha gestión, así como en los bienes asociados a esta."

Estos dispositivos legales pretenden una gestión multisectorial por cuencas, bajo la dirección de una Autoridad fortalecida, que tiene un Consejo Directivo encabezado por el Ministro de Agricultura e integrado por los Ministros del Ambiente, Salud, Energía y Minas y de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Sin perjuicio de ello, lo integran también todos los ministerios y organismos públicos, especialmente los entes reguladores que intervienen en la gestión de los recursos hídricos.

En virtud de esta Ley, las entidades del sector público que intervienen en la gestión de los recursos públicos deberán actuar coordinada e integradamente bajo la dirección de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) que se constituye como ente rector encargado de elaborar la Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos y el Plan Nacional de Recursos Hídricos.

Uno de los beneficios de dicho dispositivo es que garantiza a las Juntas de Usuarios de Riego, su participación y rol en la operación y mantenimiento de la infraestructura hidráulica. Permite una gestión más eficiente para disminuir los altos índices de contaminación de las fuentes de agua y permitirá a través de las Autoridades Administrativas del Agua disminuir los conflictos interregionales y multisectoriales por el agua.

Asimismo, se crea un Tribunal de Aguas que será última instancia administrativa en conflictos de agua y la gestión se realiza por planes multisectoriales, tomando como unidad de gestión las cuencas hidrográficas.

CAPITULO IV

COORDINACIÓN Y OPERACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO RÍMAC

La cuenca del río Rímac es una de las cuencas hidrográficas más importantes del país, al encontrarse dentro de ella la ciudad capital de Lima, cumpliendo un rol muy importante como fuente de abastecimiento de agua para el consumo humano, minero, agrícola y energético. En esta cuenca existen 5 centrales hidroeléctricas importantes pertenecientes a la empresa privada Edegel que aprovecha el caudal del río proveniente de las precipitaciones de las partes altas de las sub-cuencas, así como de la operación y regulación de los embalses y lagunas operados por Edegel y supervisados por Sedapal.

El sistema de reservorios y embalses de la cuenca del río Rímac está dividido en 3 partes importantes como son:

- Subcuenca Santa Eulalia, lado Pacífico, cuenta con 15 lagunas y logra captar un volumen útil de 77 Millones de metros cúbicos.
- Subcuenca Marcapomacocha, lado Atlántico, cuenta con 5 lagunas y logra captar un volumen útil de 157 Millones de metros cúbicos.
- Embalse de Yuracmayo, lado Pacífico, presa ubicada al margen derecho del río Rímac logrando captar un volumen útil de 48.3 Millones de metros cúbicos.

4.1. Ubicación y Extensión

Las cuencas de estudio se encuentran ubicadas en el departamento de Lima, provincia de Huarochirí y parte de la provincia de Yauli del departamento de Junín. Geográficamente se encuentra ubicada entre las coordenadas 76°02' y 76°40' de longitud oeste con 11°08' y 12°00' de latitud sur.

Las subcuencas de los ríos Santa Eulalia y Rímac, pertenecientes a la cuenca del río Rímac propiamente dicha, pertenecen a la Vertiente del Pacífico así como de la parte alta de la sub-cuenca del río Casacancha y Cosurcocha, afluentes de la margen derecha del río Mantaro, que pertenece a la Vertiente del Atlántico.

Conforme la cuenca se eleva de Lima hacia su fuente en la cordillera, el valle del río varía de un amplio plano costero, en el cual está situada Lima, a un perfil de valle bien definido que sirve de soporte a actividades agrícolas y a importantes centros de población tales como Vitarte, Chaclacayo, Chosica, Ricardo Palma y Matucana.

En la subcuenca de Santa Eulalia se ubican, aguas arriba de su confluencia con el río Rímac, las comunidades de Santa Eulalia, Collahuarca, San Pedro de Casta, Huachupampa, San Juan de Iris y Huansa.

La cuenca del río Rímac soporta un amplio rango de actividad minera la que es particularmente intensa en las zonas más altas.

4.2. Obras Hidráulicas existentes

Los represamientos de la cuenca alta del río Santa Eulalia datan del año 1875, habiéndose ejecutado el último en 1940, totalizando 15 lagunas represadas, las cuales tienen en conjunto una máxima capacidad útil de almacenamiento actual de 77.04 millones de m³.

Luego el proyecto Marca I, que trata de la derivación de Marcapomacocha y entró en operación el año de 1963, para lo cual se dispuso de una regulación de hasta cuatro lagunas represadas, que contaron con una capacidad útil de almacenamiento de 95.3 millones de m³. Las lagunas son utilizadas buscando mantener durante el estiaje del río Santa Eulalia un caudal estable que responda a la satisfacción de las demandas, teniendo en cuenta inclusive, los aportes de la derivación Marcapomacocha; iniciándose la apertura de las compuertas por lo general en el mes de mayo y terminando de cerrarlas aproximadamente a fines del mes de noviembre y a veces en diciembre.

El sistema Marcapomacocha consta de dos subcuencas, una correspondiente al represamiento en las lagunas Marcapomacocha, Antacoto y Marcacocha, y el otro que consta de las regulaciones de las lagunas de Sangrar y Tucto, ambas confluyen hacia el túnel de trasvase antes citado.

En el mes de enero de 1995 entró en funcionamiento la represa de Yuracmayo, cuyo volumen útil de almacenamiento es de 48.3 millones de m³ y cuyas aguas reguladas retornan al río Blanco.

Posteriormente se invirtió en el proyecto Marca III, implementada en noviembre de 1998, que corresponde a los afluentes de la parte alta de los ríos Cosurcocha y Casacancha, cuyas aguas fluyen al río Carhuacayán, que a su vez es afluente del río Mantaro. El área total de captación de los recursos hídricos asciende a 112.82 km². En el mes de agosto de 1999

entró en servicio la ampliación del proyecto Marca III, al aumentar el volumen embalsable del reservorio Antacoto a 120 millones de m³. En la Figura N° 4.1, se muestra las lagunas involucradas en el proyecto Marca I y Marca III.

La parte superior de la cuenca alta del río Santa Eulalia presenta un gran número de lagunas, especialmente en las subcuencas de los ríos Sacsa y Pallca o Canchis, y en la quebrada Collque, originadas por la reducida pendiente, siendo las principales: Quiula, Ruchuca, Sacsa, Huasha, Uysho, Piticuli, Quisha, Carpa, Huasca, Milloc, Chiche, Pucro, Canchis, Misha, Huallunca, Huampar, Huachua, Paucarcocha, Pirhua y Manca.

La subcuenca del río San Mateo (Rímac) comprende altitudes desde los 5,400 msnm hasta los 920 msnm y tiene un área receptora de 1,238 km². Los afluentes principales son los ríos Blanco (en donde se ubica el embalse Yuracmayo) y Parac, por la margen izquierda; y el río Condorsuni, por la margen derecha. En la Figura N° 4.2, se muestra la cuenca del río Rímac.

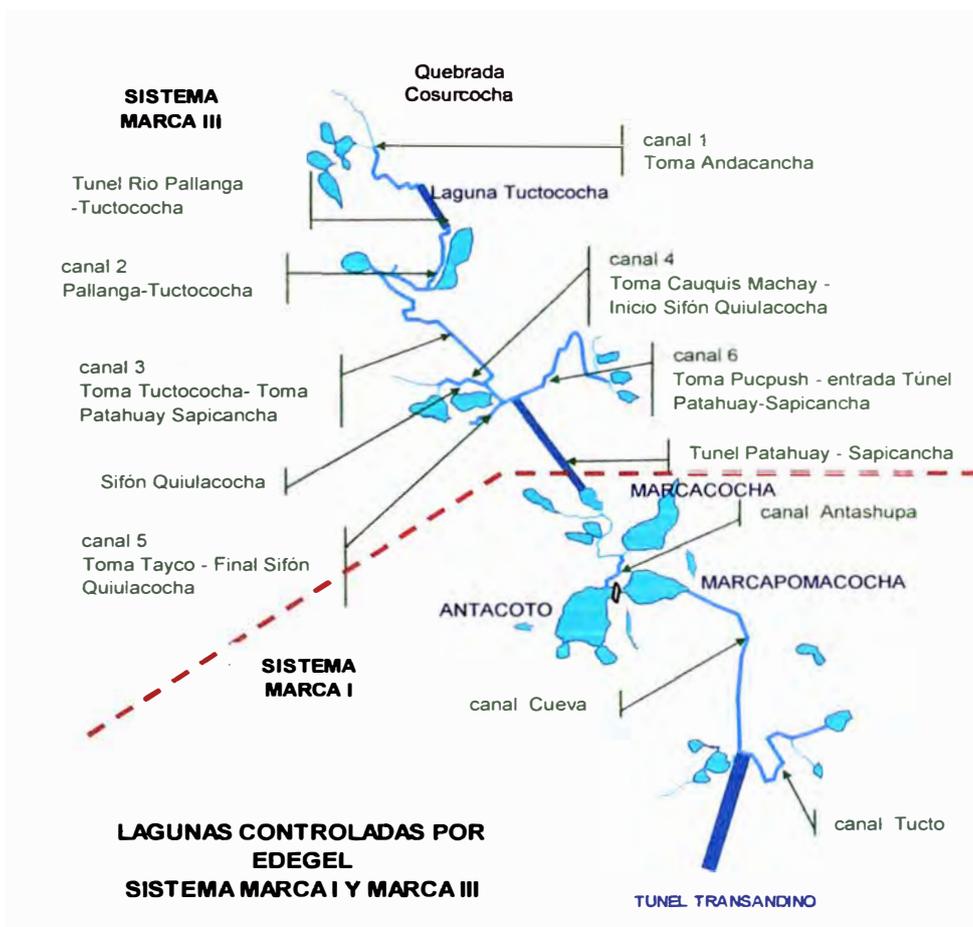


Figura N° 4.1. Sistema Marca I y Marca III

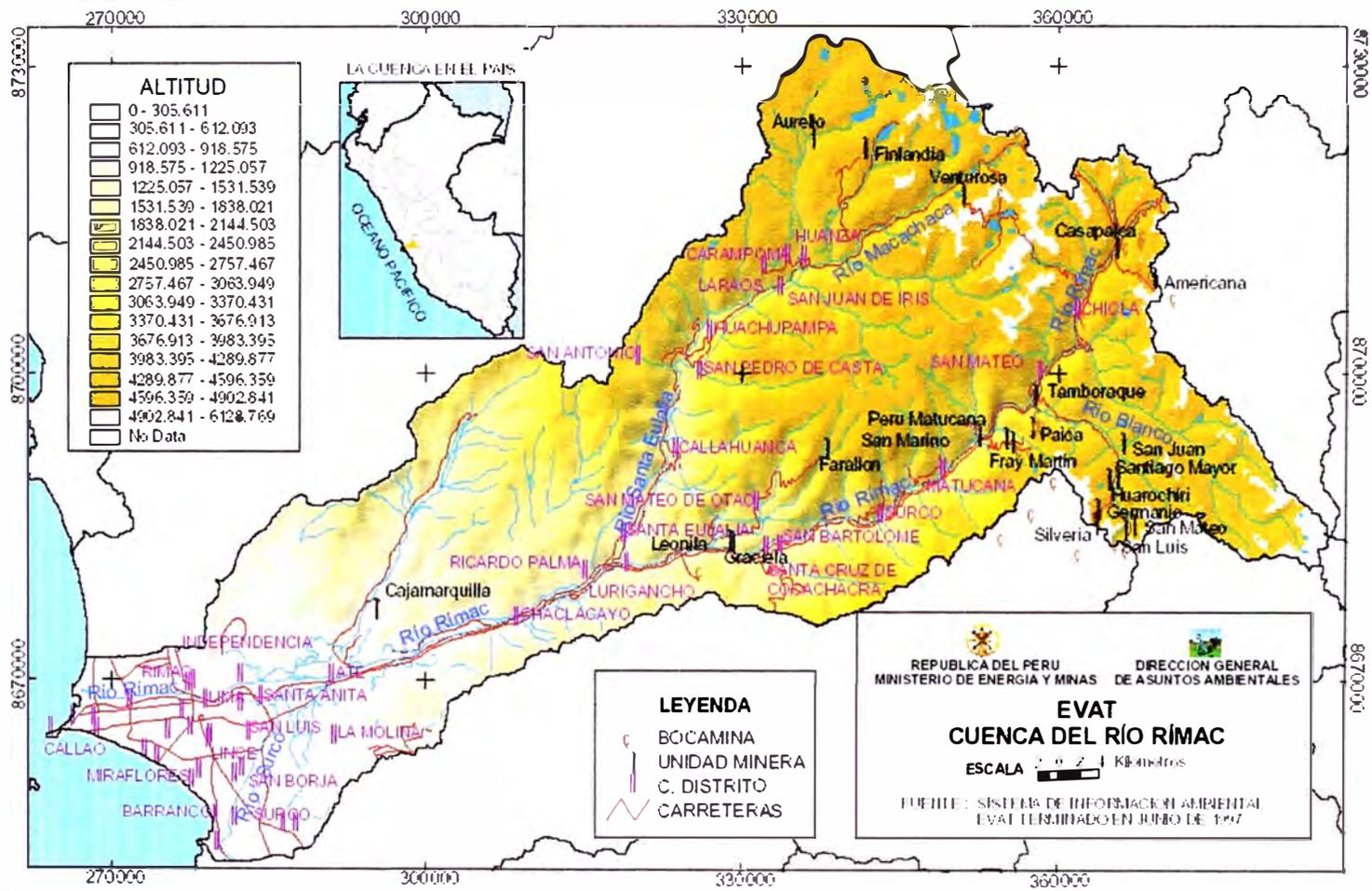


Figura N° 4.2. Cuenca del río Rímac

4.3. Memoria Descriptiva de las subcuencas del río Rímac

La cuenca en estudio está comprendida desde las nacientes del río Rímac hasta la estación de Tamboraque y desde las nacientes del río Santa Eulalia hasta Sheque. Limita por el Norte con parte de la cuenca del río Chillón y parte de la cuenca alta del río Mantaro; por el Sur, con las cuencas de los ríos Lurín y Mala, y la parte baja de la cuenca del río Rímac; por el Este, con la cuenca alta del río Mantaro; y por el Oeste, con parte de la cuenca del río Chillón.

El río Rímac presenta dos subcuencas importantes, la del río Santa Eulalia y la del Rímac, al que también se le llama río San Mateo, produciéndose la confluencia de ambos ríos cerca de la localidad de Chosica, así como se muestra en la Figura N° 4.3.

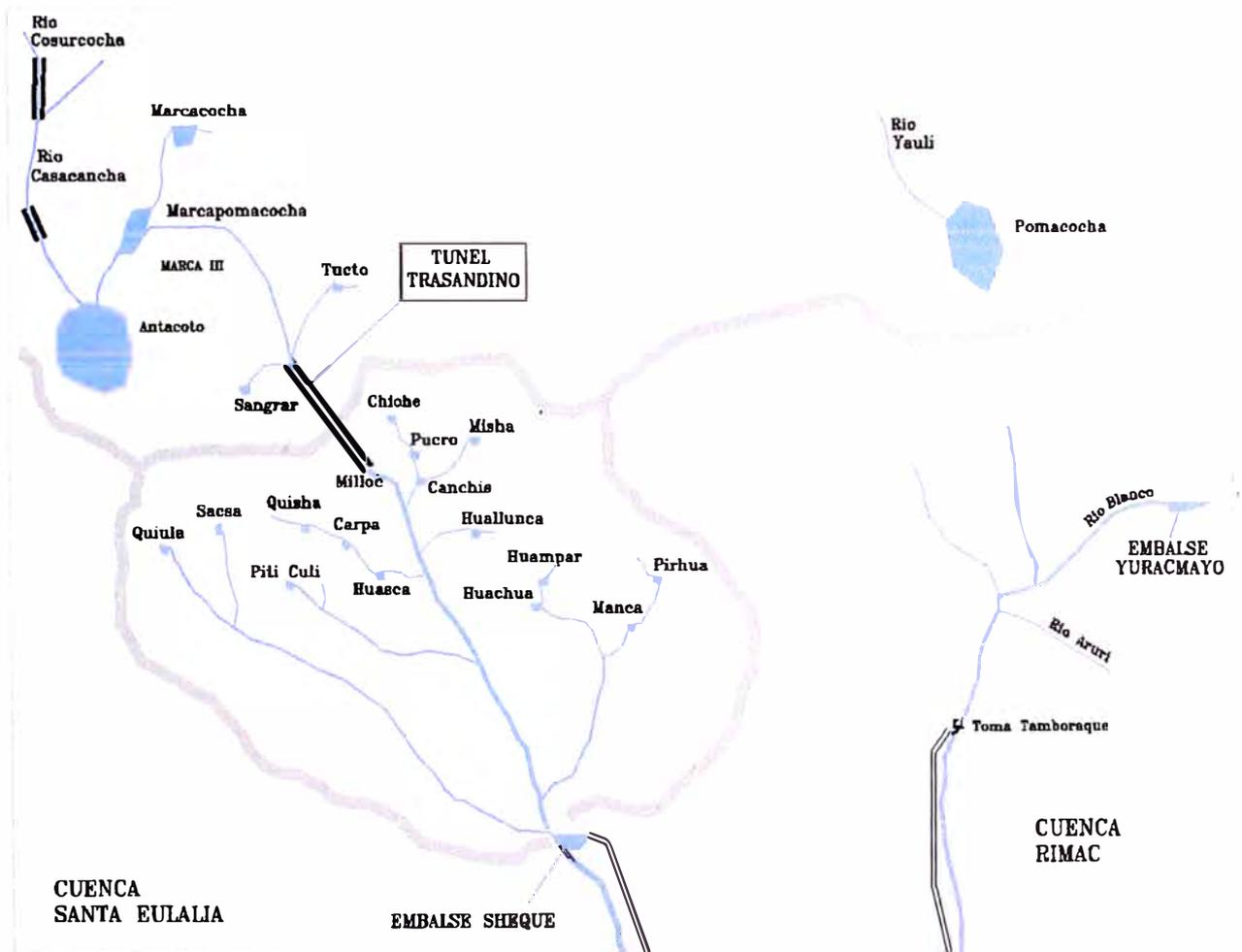


Figura N° 4.3. Sistema de Lagunas y Embalses que aportan al río Rímac

4.3.1. Subcuenca Santa Eulalia

La cuenca colectora natural del río Santa Eulalia tiene una superficie de unos 542.3 Km², de los cuales 400 Km² se encuentran en los 4300 msnm, zona de buen rendimiento hidrológico, con abundantes precipitaciones y grandes glaciares. El escurrimiento medio anual es de unos 500mm es decir entre 250 y 300 millones de m³, el período pluvial corresponde entre los meses de Noviembre a Marzo.

En esta subcuenca existen 15 lagunas, entre los cuales Sacsa, Quisha, Carpa, Huasca, Misha, Pucro, Huachua, Manca, Canchis, Pirhua fueron puestas en servicio el año de 1876 mientras que las lagunas de Chiche, Piticuli, Huampar, Quiula y Huallunca fueron puestas en servicio entre los años 1931 y 1942.

4.3.2. Subcuenca Marcapomacocha

El sistema Marcapomacocha consta de dos subcuencas, una correspondiente a los represamientos en las lagunas Marcapomacocha, Antacoto y Marcacocha, y el otro que consta de las regulaciones de las lagunas de Sangrar y Tucto, ambas confluyen hacia el Túnel Transandino.

El sistema Marcapomacocha, a través del Túnel Transandino, que tiene de 10.1 Km. de longitud y de hasta 14.5 m³/s de capacidad de conducción, deriva hacia la subcuenca del río Santa Eulalia los recursos hídricos que en su mayoría son regulados de la cuenca alta del río Carispaccha (Corpacancha), Casacancha y Cosurcocha, afluentes del río Mantaro, mediante un conjunto de obras hidráulicas constituidas por estructuras de regulación y conducción.

4.3.3. Subcuenca Rímac

La subcuenca del río Rímac comprende altitudes desde los 5,400 msnm hasta los 920 msnm y tiene un área receptora de 1,238 km². Los afluentes principales son los ríos Blanco (donde se ubica el embalse Yuracmayo) y Parac, por la margen izquierda; y el río Condorsuni, por la margen derecha.

Dentro de la subcuenca del río Rímac se ubica la presa Yuracmayo fue construido sobre el río Blanco, afluente del río San Mateo, con la finalidad de aumentar el caudal regulado en estiaje, contribuyendo al abastecimiento de agua para uso poblacional y energético.

El reservorio entró en funcionamiento en enero de 1995, y está ubicado sobre los 4,270 msnm, regulando 99 Km² de cuenca receptora. Su volumen de almacenamiento es de 48.3 millones de m³.

Tabla N° 4.1. Capacidad de las Lagunas por Vertiente

Subcuencas	Lagunas	Capacidad Total Mio m3	Area de Cuenca (Km ²)
HUASCA	Quisha	8.70	7.80
	Carpa	17.80	18.50
	Huasca	6.30	27.20
SACSA	Sacsa	16.20	32.50
	Quiula	1.90	5.20
COLLQUE	Piticuli	6.50	7.10
SHUNCHA	Huampar	3.30	8.90
	Huachua	5.10	16.80
	Pirhua	0.90	2.30
	Manca	1.60	7.10
PALLCA	Chiche	2.30	7.90
	Canchis	2.10	26.50
	Huallunca	1.60	6.30
	Misha	0.70	3.10
PUCRO	Pucro	2.00	9.40
VERTIENTE PACIFICO		77.00	186.60
PRESA YURACMAYO		48.30	99.00
CORPACANCHA	Antacoto	120.00	107.00
	Marcacocha	10.70	13.00
	Marcapomacocha	14.80	143.00
	Sangrar	8.80	22.00
	Tucto	2.75	6.00
VERTIENTE ATLANTICO		157.05	291.00
VOLUMEN TOTAL		282.35	576.60

4.4. Comunicación y Control del Sistema de Lagunas y Embalses en la cuenca del Río Rímac

Las maniobras realizadas en las lagunas y embalses provienen de las órdenes del operador del Centro de Control de Edegel por medio de sus cuatro estaciones como son Milloc, Marcapomacocha, Tamboraque y Sheque. El operador tiene la responsabilidad de asignar en forma eficiente los recursos disponibles en todo el sistema hídrico de lagunas y embalses respetando los niveles requeridos por Sedapal.

4.4.1. Equipamiento

a) Equipamiento Mecánico

Todas las compuertas son de accionamiento manual. A continuación se detalla sus características:

Tabla N° 4.2. Tipo de Accionamiento de Compuertas

Estación	Tipo de accionamiento de Compuertas
Laguna Quisha	2 de 70 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Carpa	2 de 70 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Huasca	2 de 90x110 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Sacsa	2 de 70 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Quiula	1 de 70 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Piticuli	1 de 85x105 cm, tiene engranaje central de transmisión y una cremallera de izaje, maniobradas por volante.
Laguna Huampar	1 de 90 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Huachua	1 de 90 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Pirhua	1 de 90 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Manca	2 de 90 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Chiche	1 de 90 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Canchis	1 de 90x110 cm, tiene engranaje central de transmisión y una cremallera de izaje, maniobradas por volante.
Laguna Huallunca	1 de 90x110 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Misha	1 de 90 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Pucro	1 de 90 cm, sistema manual con cremallera central. Izaje tipo RATCHET.
Laguna Antacoto	2 de 1.4 m, tiene engranaje central de transmisión y una cremallera de izaje, maniobradas por volante.
Laguna Marcacocha	2 de 1.6 m, tiene engranaje central de transmisión y una cremallera de izaje, maniobradas por volante.
Laguna Marcapomacocha	2 de 1.6 x 1.5 m, tiene engranaje central de transmisión y una cremallera de izaje, maniobradas por volante.
Laguna Sangrar	2 de 0.5 x 1.4 m, tiene engranaje central de transmisión y una cremallera de izaje, maniobradas por volante.
Laguna Tucto	1 de 0.7 m, tiene engranaje central de transmisión y una cremallera de izaje, maniobradas por volante.

b) Equipamiento Eléctrico y Control

Algunas lagunas y presas están implementadas con equipos para la medición de caudal, nivel, evaporación, pluviómetro, etc., como se muestra en la Tabla N° 4.3.

Tabla N° 4.3. Equipamiento para medición

Estación	Equipamiento
Presas Sheque	- Sistema de alimentación solar de 24 V corriente continua.
Laguna Sacsa	- Instrumentación.
Laguna Huasca	- Señales digitales para monitoreo / control.
Laguna Milloc	- Equipo PLC para tratamiento de señales, almacenamiento histórico y comunicación con el sistema SCADA.
Entrada Túnel Trasandino	
Presas Yuracmayo	- 4 Bancos de Batería

c) Equipamiento de Comunicación

En la Tabla N° 4.4 se listan las instalaciones que presentan equipamiento para comunicación satelital con el Centro de Control de Edegel.

Tabla N° 4.4. Equipamiento de comunicación

Estación	Equipamiento
Presas Sheque	
Laguna Sacsa	
Laguna Huasca	Teléfono satelital que permite el intercambio de información
Laguna Milloc	PLC-SCADA.
Entrada Túnel Trasandino	
Presas Yuracmayo	

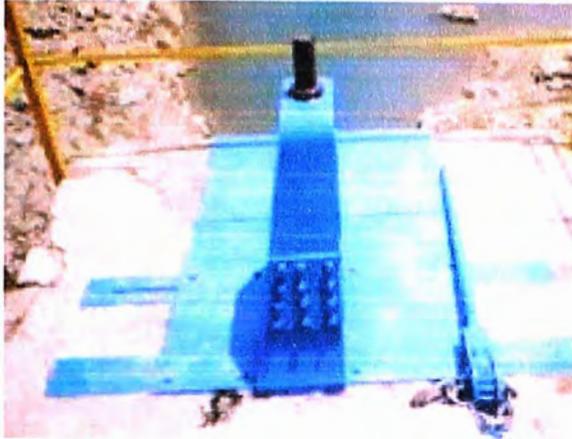


Figura N° 4.4. Mecanismo de accionamiento en Huallunca. Eje central accionado por palanca y RATCHET



Figura N° 4.5. Mecanismo de accionamiento en Canchis. Volante con reductor y cremallera.



Figura N° 4.6. Mecanismo de accionamiento en Huasca. Eje central accionado por palanca



Figura N° 4.7. Mecanismo de accionamiento en Piticuli. Volante con reductor y cremallera.

4.4.2. Tiempo de Respuesta de Maniobras

Actualmente las maniobras en las lagunas y presas no son inmediatas, debido a que no son telecomandadas y por eso se hace necesario disponer de un operador presente en cada estación de trabajo, el cual al recibir la orden de maniobra del Centro de Control de Edegel, tiene que desplazarse con movilidad hasta la laguna asignada.

En la Figura N° 4.8 se presenta el tiempo promedio de respuesta en las maniobras de lagunas y embalses (T1), así como el tiempo promedio de viaje del agua entre lagunas y Sheque o Tamboraque (T2). Se observa que las lagunas de Huallunca, Huasca, Piticuli y Canchis se pueden maniobrar en emergencia por tener un tiempo de respuesta más rápido, caso contrario sucede con Huachua y Manca por tener un tiempo de respuesta de 1 día.

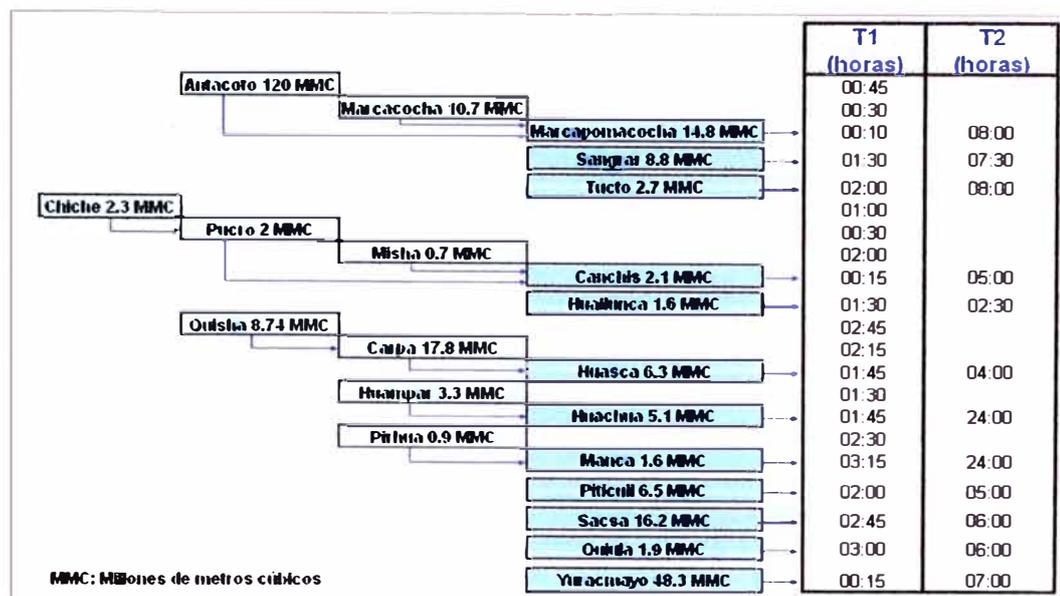


Figura. N° 4.8. Tiempo de respuesta en maniobras de lagunas

En la Figura N° 4.9 se muestra el esquema topológico del sistema hídrico en estudio, así como también el tiempo promedio de viaje del agua entre lagunas, embalses y tomas. Este diagrama se tomará luego como referencia en el capítulo 4 para graficar el diagrama topológico en el programa computacional.

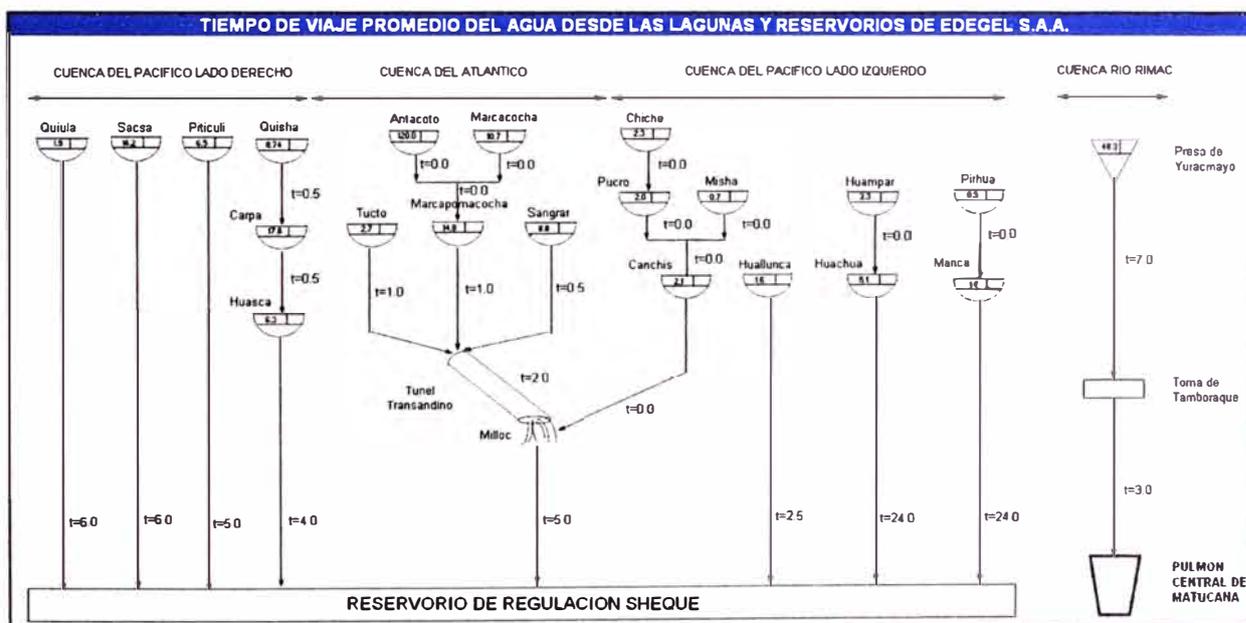


Figura N° 4.9. Tiempo de viaje promedio del agua entre lagunas, embalses y tomas.

4.5. Coordinación y Operación de las Centrales Hidráulicas en la cuenca del río Rímac

Edegel es una empresa privada dedicada a la generación de energía eléctrica. Sus orígenes datan desde 1906 con el nombre de Empresas Eléctricas Asociadas, empresa privada dedicada a la generación, transmisión y distribución de electricidad. Posteriormente, en 1974 el capital de dicha empresa pasó a poder del Estado, cambiando su razón social a Electrolima.

En 1994, la empresa fue separada en tres diferentes unidades de negocio como son la generación, transmisión y distribución. El negocio de generación fue el origen de la Empresa de Generación Eléctrica de Lima S.A. (Edegel) el que fue transferido al sector privado en 1995, cuando el Estado vendió el 60% del capital social al consorcio Generandes.

Edegel es la mayor compañía privada de generación de electricidad en el Perú. A la fecha cuenta con una potencia efectiva total de 1467 MW, de la cual 745 MW corresponde a potencia hidroeléctrica y 722 MW a potencia termoeléctrica.

Edegel forma parte del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional donde realiza sus operaciones como integrante del Comité de Operación Económica del Sistema Eléctrico Nacional (COES - SINAC) cumpliendo con las normas aplicables a las actividades del sector eléctrico establecidas por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y supervisadas por Osinergmin.

Edegel cuenta con 5 centrales hidráulicas en Lima, 2 centrales hidráulicas en Junín y 2 plantas de generación termoeléctrica en Lima.

4.5.1. Central Huinco

Se ubica en el distrito de San Pedro de Casta, provincia de Huarochirí, instalado en una caverna semicircular de 108 m. de largo y 31 m. de ancho y 24 m. de alto. Se llega a la planta mediante una galería de acceso de 858 m. de longitud.

La central fue construida en una caverna debido a la estrechez presente a la altura de Huinco, no dejaba espacio suficiente para la construcción de la central ni del patio de llaves. Por otro lado, la galería inclinada acorta la longitud de la tubería forzada, permitiendo a la roca absorber el 50% de la presión de agua. Con ello se redujo en más del 50% el costo del conducto forzado.

El agua turbinada de la central proviene de las subcuencas de Marcapomacocha por la vertiente del Atlántico y de Santa Eulalia por la vertiente del Pacífico. Las lagunas de ambas

cuencas están a su vez comunicadas a través de un túnel de 10.12 Km. de longitud llamado "Túnel Trasandino", con un caudal máximo de 12 m³/s.

La central cuenta además para su operación con la presa Sheque con un volumen de 430,000 m³ y la presa Huinco con 260,000 m³. La presa Sheque funciona como una presa de regulación estacional para la central Huinco al permitir descargar el volumen necesario en la época de estiaje cuando el caudal de agua es escaso. Mientras que la presa Huinco funciona como una presa de regulación horaria para la central Callahuanca; esta presa en época de estiaje es embalsada en su totalidad y en época de avenida se mantiene el embalse vacío para evitar la acumulación de lodo y piedras antes posibles huaycos.

Se detalla las principales características de la central en la Tabla N° 4.5 y un esquema hidráulico asociado a la central en la Figura N° 4.10.

Tabla N° 4.5 Detalle general de la central Huinco

Características Generales:	
Potencia efectiva	247.3 MW
Caudal de la central	25 m ³ /seg.
Altura bruta de caída	1293 m.
Turbina tipo	Pelton doble; Eje horizontal
Número de unidades	4
Puesta en servicio (1ra. unid.)	1964
Ubicación:	
• 63.5 km. al este de Lima. Distrito de San Pedro de Casta. Provincia de Huarochirí. Departamento de Lima	
Tipo:	
• Central de regulación, recibe agua del río Santa Eulalia y de la Cuenca Marcapomacocha, cuenta con el reservorio Sheque de 430,000 m ³ .	

En la Figura N° 4.10 se muestra también como el agua turbinada de la central Huinco aporta a la central Callahuanca por medio de un canal que alimenta a la taza ó cámara de carga de Callahuanca. Esta cámara de carga recibe también el aporte del agua turbinada por la central Matucana.

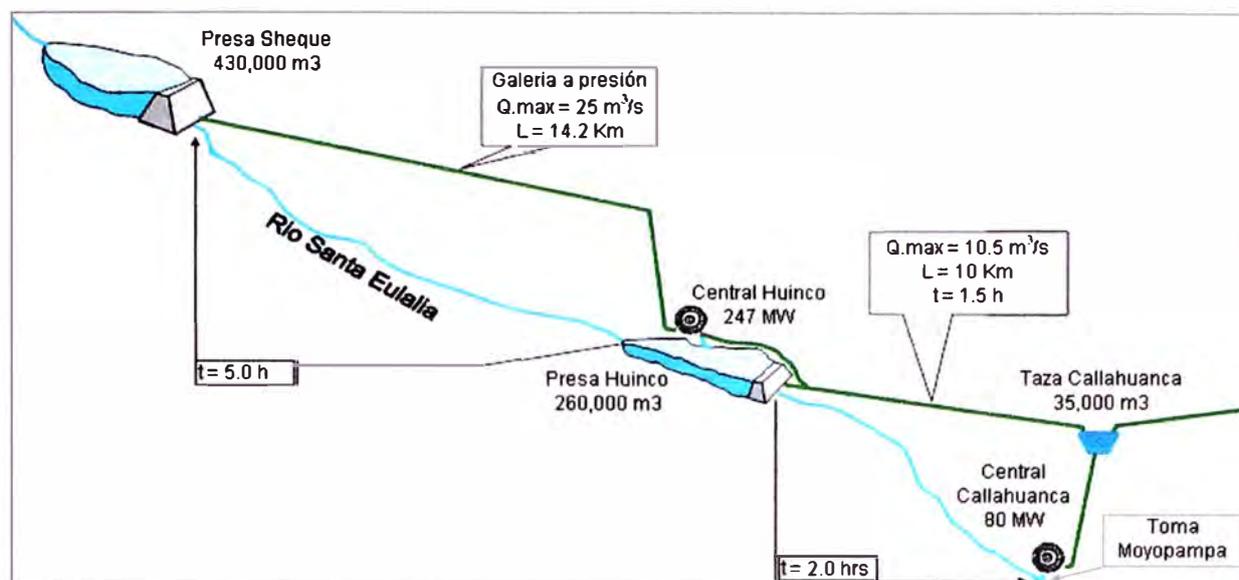


Figura N° 4.10 Esquema Hidráulico de la central Huinco

4.5.2. Central Matucana

La central Matucana se encuentra ubicada en el distrito de San Jerónimo de Surco, provincia de Huarochirí. La central para su proceso de generación aprovecha las aguas del embalse Yuracmayo, que a través de la toma de captación de Tamboraque y la cámara de carga ó Pulmón Matucana, aportan el caudal necesario para el funcionamiento de la central.

La toma de captación de Tamboraque está ubicada en el kilómetro 91 de la carretera central, a 100 m. aguas abajo de la unión de los ríos Rímac y Aruri, a una altitud de 2,930 msnm, el caudal captable es hasta 14.8 m³/s para la necesidades de generación. La toma está conectada a la central mediante un túnel de 20 Km. de longitud.

El Pulmón de Matucana está conformado por dos cámaras subterráneas de 500 m. de longitud con una capacidad de 30,000 m³ por cámara. Esta se comporta como una presa de regulación horaria y es que debido a estas cámaras, la central puede operar hasta tres horas a potencia efectiva.

En la Tabla N° 4.6 se muestra las características más importantes de la central y en la Figura N° 4.11 se muestra un esquema hidráulico de la central y su aporte a la cámara de carga de Callahuanca.

Tabla N° 4.6 Detalle general de la central Matucana

Características Generales:

Potencia efectiva	128.6 MW
Caudal de la central	14.8 m ³ /seg.
Altura bruta de caída	987 m.
Turbina tipo	Pelton doble; Eje horizontal
Número de unidades	2
Puesta en servicio (1ra. unid.)	1971

Ubicación:

• 64.5 km. al este de Lima. Distrito de San Jerónimo de Surco. Provincia de Huarochirí. Departamento de Lima

Tipo:

• Hidroeléctrica de pasada, recibe aguas del río Rímac y embalse Yuracmayo

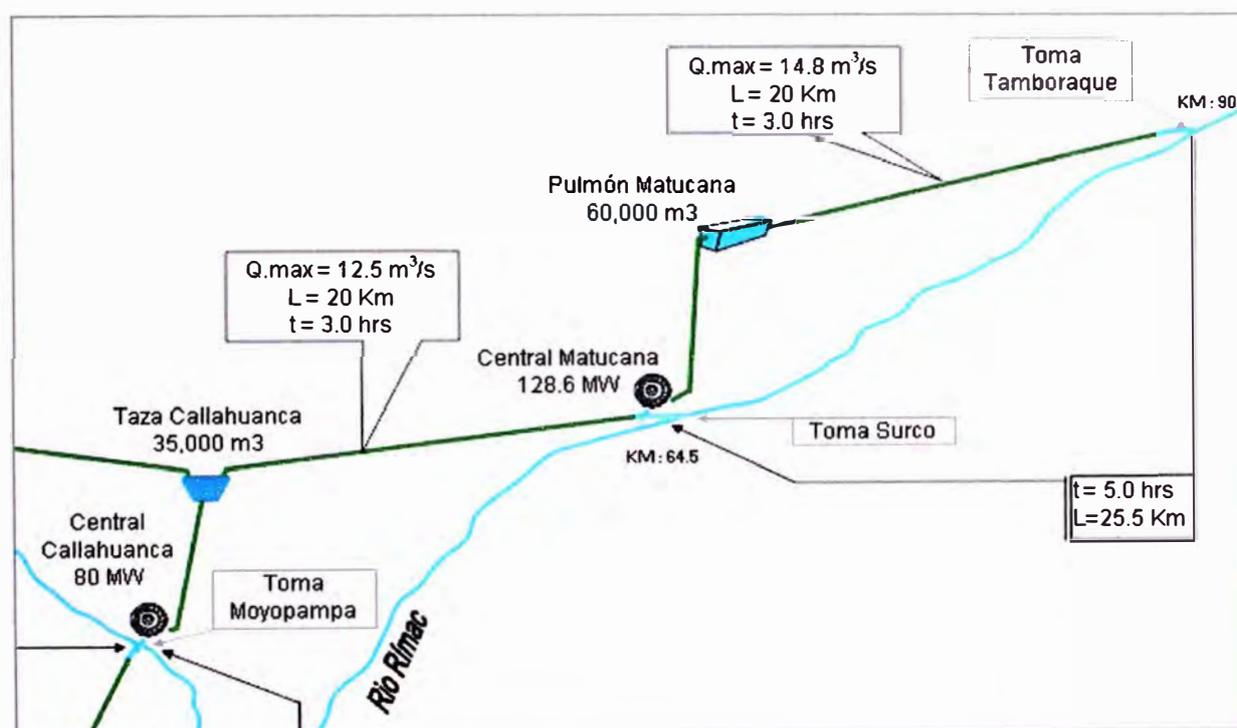


Figura N° 4.11. Esquema Hidráulico de la central Matucana

4.5.3. Central Callahuanca

En 1922, Empresas Eléctricas Asociadas, decidió trabajar en un proyecto de expansión de la producción eléctrica ya que en aquella época se aproximaba una explosión demográfica en Lima, por lo cual el ingeniero Juan Carosio planteó desarrollar un gran proyecto en conjunto

con el ingeniero Pablo Boner. El proyecto tenía un esquema que consistía en utilizar en forma escalonada el caudal del río rímac.

Se decidió comenzar los trabajos con la construcción de la central Callahuanca, que se ubicaría en la quebrada del mismo nombre, en el río Santa Eulalia. Esta obra fue el primer eslabón de la cadena hídrica planteada por Boner, estaba pensada sobre la base de un máximo aprovechamiento, mediante nuevos dispositivos de acumulación y control de las lagunas de la cuenca colectora del río Santa Eulalia.

La construcción se inició en marzo de 1934 y a fines de marzo de 1938 la obra llegó a su término y, tras diversos ensayos y pruebas, finalmente, el 7 de mayo fue inaugurada la central Callahuanca empezando a trabajar con 3 grupos generadores de 12.25 MW cada uno. Finalmente el 18 de abril 1958 se puso en servicio un cuarto grupo de 30.80 MW.

En el año 2007 la central sufrió una repotenciación de los grupos generadores llegando sumar una potencia efectiva total de 80.43 MW.

La central se abastece de las aguas provenientes de las cuencas Santa Eulalia y Rímac, después de ser aprovechadas por las centrales de Huinco y Matucana respectivamente, luego llegan a la cámara de carga de la central mediante los acueductos que se encuentran en el lado de la central Huinco y la otra en el lado Matucana.

El acueducto lado Huinco está conformado por 2 tramos, uno de tramo abierto y el otro tipo túnel. El agua turbinada de la central Huinco llega a la Presa Huinco ubicada cerca a la central. Esta cuenta con tres compuertas, dos de ellas, llamadas compuertas de fondo, que envían el agua al río Santa Eulalia cuando la represa alcanza su nivel máximo, y la compuerta de admisión que alimenta a la cámara de carga de la central Callahuanca. El caudal máximo transmitido por el lado Huinco es de $10.5 \text{ m}^3/\text{seg}$.

El caudal transportado por el acueducto lado Matucana proviene del agua turbinada de la central Matucana, que tiene la característica de pelo libre y un caudal máximo transmitido de $12.5 \text{ m}^3/\text{seg}$. Se muestra sus características principales en la Tabla N° 4.7.

La cámara de carga de Callahuanca está dividida en 2 partes:

a) Cámara de Carga Lado Huinco

La taza lado Huinco cuenta con 11 desarenadores para eliminar el material sedimentado. La cámara lado Huinco es una cámara de paso y cuenta con un pulmón de $10,000 \text{ m}^3$, de los cuales solo se cuenta con $2,000 \text{ m}^3$ de volumen útil para regulación inmediata, cuando los grupos están a plena carga.

b) Cámara de Carga Lado Matucana

La taza lado Matucana sirve para alimentar al grupo N° 4, cuenta con un pulmón de 25,000 m³ de volumen útil y posee solamente tres desarenadores.

Tabla N° 4.7 Detalle general de la central Callahuanca

Características Generales:	
Potencia efectiva	80.4 MW
Caudal de la central	20.5 m ³ /seg.
Altura bruta de caída	435 m.
Turbina tipo	Pelton; Eje Horizontal
Número de unidades	4
Puesta en servicio (1ra. unid.)	1938
Ubicación:	
• 52.5 km. al este de Lima. Distrito de Callahuanca. Provincia de Huarochiri. Departamento de Lima	
Tipo:	
• Hidroeléctrica de pasada, recibe aguas de los ríos Rímac y Santa Eulalia	

4.5.4. Central Moyopampa

La central Moyopampa se ubica en el distrito de Lurigancho, provincia de Lima. Esta central aprovecha el agua turbinada de la central Callahuanca para que a través de la presa Moyopampa y por medio de una compuerta de desvío, el agua pase por un sifón en la solera de la presa hacia el canal que alimenta a la cámara de carga de la central Moyopampa.

La cámara de carga de la central tiene la función de amortiguar las variaciones de carga, se comporta como una presa de regulación horaria, siendo su capacidad de 25,500 m³. Luego el agua se dirige a la casa de máquinas a través de tres tuberías a presión de 800 m. de longitud. El caudal máximo es de 17.5 m³/seg. y la caída neta a presión es de 468 m. Se muestra las principales características de la central en la Tabla N° 4.8.

4.5.5. Central Huampaní

La central se ubica en el distrito de Lurigancho, provincia de Lima. La central entró en operación el año 1960. Cuenta con un sistema compuesto de dos generadores de eje horizontal, los cuales se hallan conectados a dos turbinas Francis con una potencia por rodete de 20,750 HP.

La toma de Huampaní se ubica en el cauce del río, que a través de su canal de conducción que consta de un tramo abierto de 4.6 Km. y otro tipo túnel de 5.8 Km. alimentan a la cámara de carga de la central Huampaní con una capacidad de 12,000 m³, para luego pasar a la casa de máquinas con una caída bruta de 177 m.

En la Tabla N° 4.9 se muestra las características principales de la central Huampaní y en la Figura N° 4.12 se muestra un esquema de las centrales bajas desde la central Callahuanca hasta la central Huampaní.

Tabla N° 4.8. Detalle general de la central Moyopampa

Características Generales:	
Potencia efectiva	64.7 MW
Caudal de la central	17.5 m ³ /seg.
Altura bruta de caída	468 m.
Turbina tipo	Pelton; Eje Horizontal
Número de unidades	3
Puesta en servicio (1ra. unid.)	1951
Ubicación:	
• 40 Km. al este de Lima. Distrito de Lurigancho. Provincia de Lima. Departamento de Lima.	
Tipo:	
• Hidroeléctrica de pasada, recibe aguas de los ríos Rímac y Santa Eulalia	

Tabla N° 4.9. Detalle general de la central Huampani

Características Generales:	
Potencia efectiva	30.2 MW
Caudal de la central	18.5 m ³ /seg.
Altura bruta de caída	177 m.
Turbina tipo	Francis; Eje horizontal
Número de unidades	2
Puesta en servicio (1ra. unid.)	1960
Ubicación:	
• 16 km. al este de Lima. Distrito de Lurigancho. Provincia de Lima. Departamento de Lima.	
Tipo:	
• Hidroeléctrica de pasada, recibe aguas del río Rímac y Santa Eulalia.	

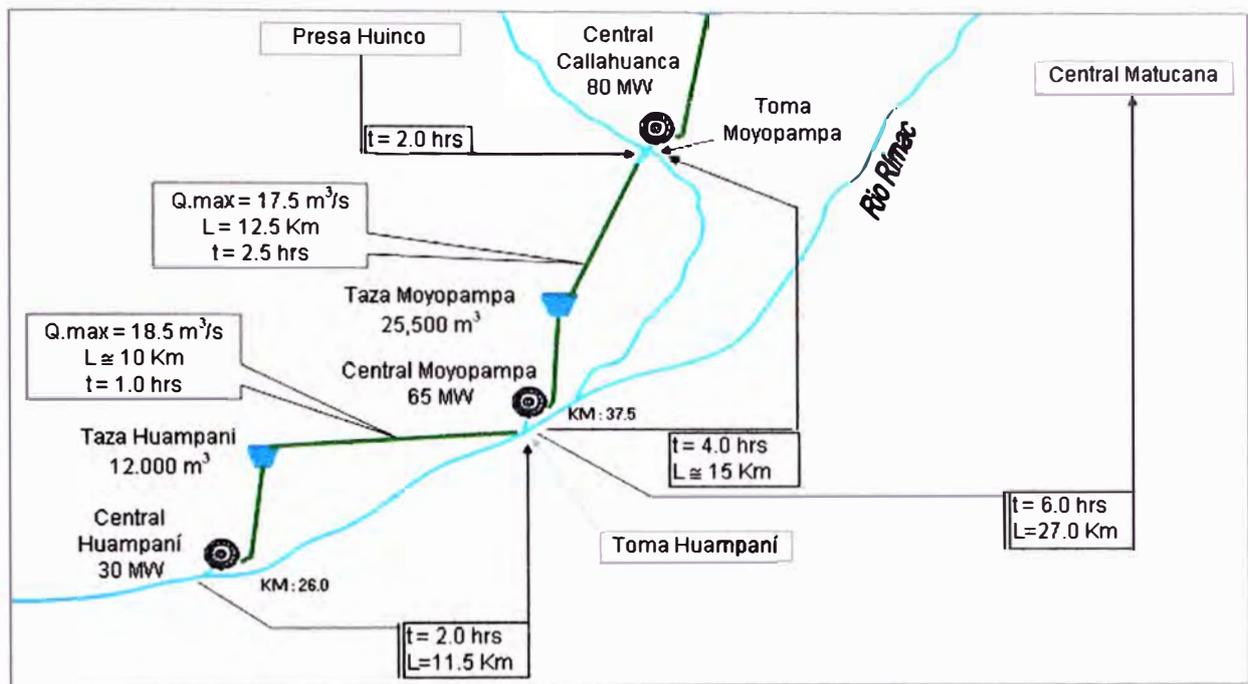


Figura N° 4.12. Esquema hidráulico de las centrales bajas

En la Figura N° 4.13 se muestra un esquema de todo el sistema hidráulico de las centrales de Edegel ubicadas en la ciudad de Lima.

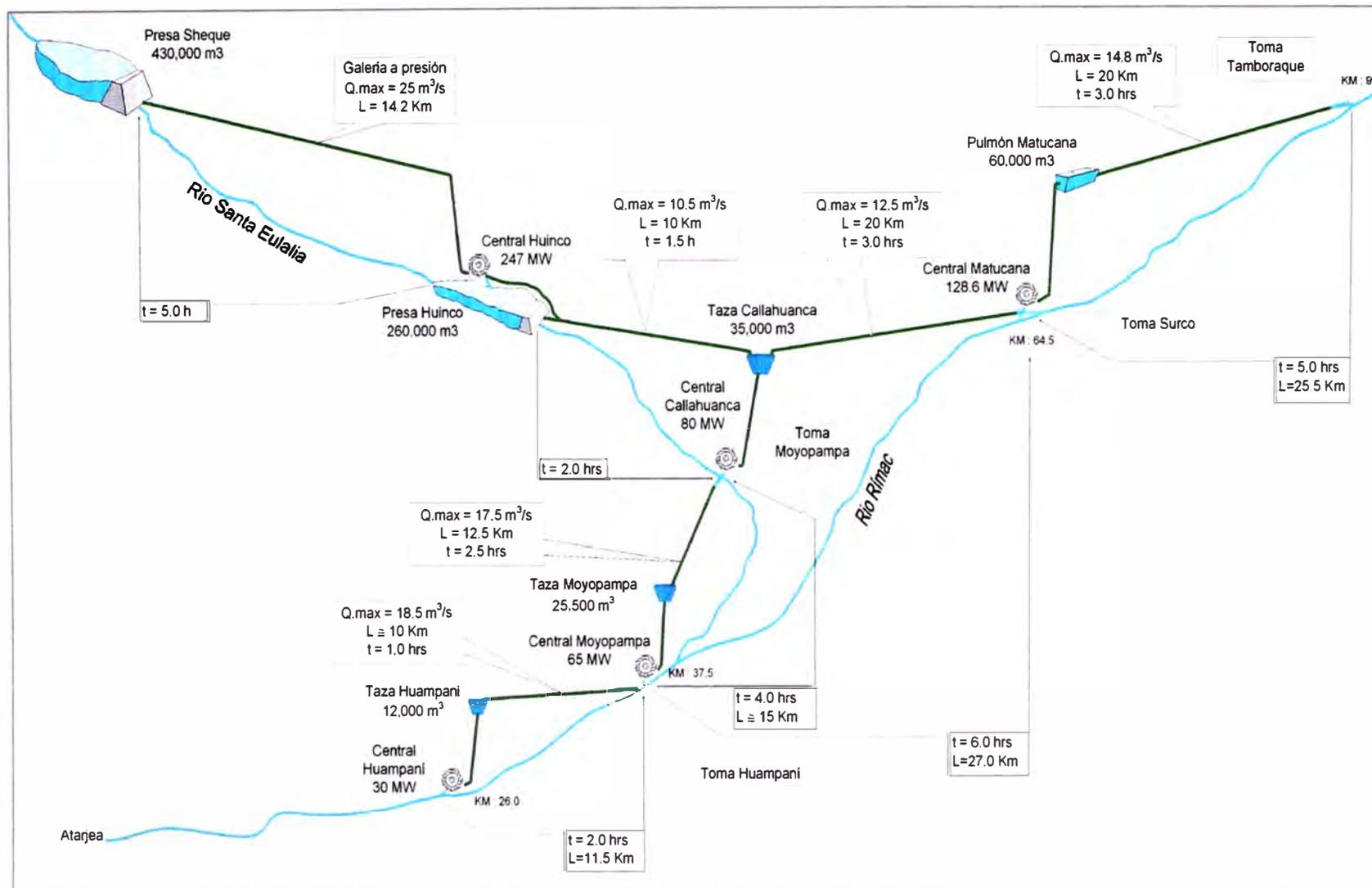


Figura Nº 4.13. Sistema Hídrico de Centrales Hidráulicas, Tomas y Embalses de la cuenca del río Rímac.

4.6. Coordinación y Operación del Sistema Eléctrico Peruano

El Comité de Operación Económica del Sistema (COES) es una entidad privada, sin fines de lucro y con personería de Derecho Público. Está conformado por todos los agentes del SEIN (Generadores, Transmisores, Distribuidores y Usuarios Libres) y sus decisiones son de cumplimiento obligatorio por los agentes. Tiene por finalidad coordinar la operación de corto, mediano y largo plazo del Sistema Interconectado Nacional (SINAC) al mínimo costo, preservando la seguridad del sistema, el mejor aprovechamiento de los recursos energéticos, así como planificar el desarrollo de la transmisión y administrar el mercado de corto plazo.

En 1992 se produce la reestructuración del sector eléctrico con la promulgación de la Ley de Concesiones Eléctricas, Decreto Ley N° 25844, la cual entre otras reformas importantes (separación de las actividades de generación, transmisión y distribución, creación de un mercado libre y un mercado regulado, régimen de concesiones, etc.) dispone la creación de un organismo técnico sin fines de lucro denominado Comité de Operación Económica del Sistema (COES) donde existan sistemas interconectados, fijando como misión de este organismo técnico la de coordinar la operación de las centrales de generación eléctrica y de los sistemas de transmisión eléctrica al mínimo costo, garantizando la seguridad del abastecimiento de energía eléctrica y el mejor aprovechamiento de los recursos energéticos. El primer COES, se funda el 17 de agosto de 1993 para el Sistema Interconectado Centro Norte (SICN), reuniendo a las empresas de generación y transmisión que en ese entonces estaban integradas a dicho sistema, teniendo el nombre de COES-SICN. Habiendo adoptado inicialmente la forma de asociación civil sin fines de lucro, fue redefinida posteriormente como persona jurídica de derecho público interno, al obedecer su creación al mandato de la Ley de Concesiones Eléctricas y regirse por el Reglamento de dicha Ley, el que fuera aprobado por Decreto Supremo N° 009-93-EM, iniciando sus operaciones como tal el 1 de enero de 1995. Paralelamente, en el Sistema Interconectado Sur (SIS) se constituyó el COES-SUR el 9 de octubre de 1995.

En octubre de 2000, al producirse la interconexión del SICN con el SIS debido a la entrada en operación de la Línea de Transmisión Mantaro-Socabaya, el COES-SICN incorporó a las empresas integrantes del COES-SUR, así como a las empresas de transmisión Consorcio Transmantaro S.A. y Red Eléctrica del Sur S.A. En cumplimiento del Artículo 2° del Decreto Supremo N° 011-2001-EM, que modifica el Reglamento de la Ley de Concesiones Eléctricas, el COES-SICN modifica su Estatuto y cambia su denominación a Comité de Operación

Económica del Sistema Interconectado Nacional COES-SINAC, quedando constituido como el COES del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.

Posteriormente, el 5 de setiembre de 2002, se incorporó al COES-SINAC la empresa Red de Energía del Perú (REP), al asumir las concesiones que correspondían a Empresa de Transmisión Eléctrica Centro Norte (ETECEN) y Empresa de Transmisión Eléctrica del Sur (ETESUR), como consecuencia de la suscripción con el Estado Peruano del respectivo Contrato de Concesión de Sistemas de Transmisión Eléctrica. Asimismo, el 22 de setiembre de 2002, se incorporó la empresa Interconexión Eléctrica ISA Perú.

En el año 2006 la Ley N° 28832, Ley Para Asegurar el Desarrollo Eficiente de la Generación Eléctrica, introdujo cambios importantes en la organización del COES. Se estableció la incorporación como Integrantes de la Asamblea a las empresas distribuidoras de electricidad y los usuarios libres conectados al SINAC, asimismo se dispuso una nueva conformación del Directorio, y la creación de la Dirección Ejecutiva como principal órgano de gerencia y administración del COES.

La Asamblea está conformada por los Integrantes Registrados, agrupados en 4 subcomités: de Generadores, de Distribuidores, de Transmisores y de Usuarios Libres; mientras que el Directorio está integrado por 5 miembros, de los cuales 4 son elegidos por cada subcomité y el Presidente lo elige la Asamblea.

Estos cambios se concretaron en el año 2008, tras la publicación del Decreto Supremo N° 027-2008-EM, Reglamento del Comité de Operación Económica del Sistema (COES), procediéndose a la adecuación del COES a su nueva organización, con la aprobación de modificaciones a su Estatuto y la elección del nuevo Directorio.

Actualmente conforman el COES 16 Generadores, 7 Transmisores, 10 Distribuidores y 36 Usuarios Libres.

4.7. Coordinación y Operación del Sistema de Agua Potable para Lima Metropolitana.

4.7.1. Regulación en el Sector Saneamiento

El servicio de agua potable y alcantarillado es el único servicio público donde no ha ocurrido privatizaciones, excepto en términos de promoción a la inversión privada, fue la concesión a la empresa italiana Impregilo en diciembre de 1999, por unos pozos de agua y una planta de tratamiento en la cuenca del río Chillón para vender agua a Sedapal.

A inicios de los años 1990 se trató de tener una administración más eficiente mediante su descentralización, otorgando el control a las municipalidades del país a excepción de la ciudad de Lima, donde los servicios de agua potable son provistos por la empresa estatal de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL).

En 1992 se creó la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento, SUNASS como el órgano regulador del sector. SUNASS es responsable por la calidad de los servicios prestados, la regulación tarifaria, así como las coordinaciones intersectoriales, la aprobación de los planes de inversión y la supervisión de dichas inversiones.

Hoy en día, el sector saneamiento cuenta con 54 Empresas Prestadoras de Servicios (EPS), entre ellas, se encuentra SEDAPAL que atiende al 29% de la población del país, ubicada en las provincias de Lima y Callao. Las otras 53 EPS son de propiedad municipal y atienden el 33% de la población ubicada en 162 provincias del país. Existen otras administraciones urbanas a cargo directo de los municipios que atienden al 9% de la población del país. El restante 29% de la población básicamente ubicada en el área rural es atendido por organizaciones comunales que constituyen las Juntas Administradoras de Servicios de Saneamiento.

a) Antecedentes

A mediados de la década de los años 1980, los servicios de agua potable y alcantarillado de los centros urbanos fueron manejados en forma centralizada por el Estado, salvo en algunos casos aislados como el de las poblaciones más pequeñas y alejadas. Esta tendencia se debe a una planificación y un manejo global de los servicios según un modelo que se extendió en muchos países de América Latina.

Este modelo, válido para aquella época y circunstancias, se basa en el concepto de un servicio público que debe ser financiado y subsidiado por el Estado, siendo su meta principal la cobertura total de las necesidades de los pobladores por razones sanitarias. Para este modelo la eficiencia empresarial queda relegada a un segundo plano.

En 1981, el Presidente Fernando Belaúnde creó el Servicio Nacional de Agua Potable y Alcantarillado (SENAPA) que reemplazó a la Dirección General de Obras Sanitarias, convirtiendo a todas las empresas de agua potable y alcantarillado en “subsidiarias” o “unidades operativas” de SENAPA. Estas empresas debían operar con autonomía económica, financiera y administrativa.

A pesar de la existencia de SENAPA, la provisión de agua potable en algunas localidades era responsabilidad directa de las municipalidades provinciales o distritales. En las zonas rurales el Ministerio de Salud era el responsable de la provisión del servicio.

La estructura del servicio nacional de agua potable y alcantarillado permaneció centralizada hasta fines de los ochenta. Sin embargo, pocos meses antes de terminar su primer mandato en abril de 1990, el presidente Alan García promulgó las Leyes N° 23878 y 24650 y los Decretos Legislativos N° 574 y 601 que buscaban descentralizar la estructura existente.

Mediante estos decretos, la responsabilidad del servicio de agua potable y alcantarillado que estaba en las empresas subsidiarias de SENAPA, fue transferido a las autoridades provinciales y distritales. La única excepción fue SEDAPAL que continuó en manos del gobierno central. Asimismo, la responsabilidad por las zonas rurales fue transferida del Ministerio de Salud a los gobiernos regionales. Durante 1990, la cobertura del servicio de agua potable y de alcantarillado en el Perú eran de 75.5 % y 78.1 % respectivamente.

En términos de eficiencia operativa, el sector de agua potable y alcantarillado reportaba una diferencia de aproximadamente 196 millones de m³ entre el volumen de agua producido y el volumen facturado, lo que implica que un 36.1% de la producción de agua no era facturada. Finalmente, los resultados financieros eran desalentadores y mostraban niveles de inversión de US\$ 14.27 millones y pérdidas netas después de impuestos de US\$ 21.3 millones. El costo real promedio por metro cúbico de agua producida estaba alrededor de 0.043 soles.

b) Reformas

Durante la gestión del Presidente Fujimori varias leyes fueron promulgadas para promover la participación del sector privado en agua potable y alcantarillado con el fin de financiar proyectos de infraestructura que el sector público era incapaz de solventar.

En 1991, se promulgó el decreto legislativo N° 697 también conocido como La Ley de Promoción de la Inversión Privada. Esta ley promueve la inversión privada en el campo del saneamiento, a nivel de explotación de los servicios, dejando la decisión del otorgamiento del correspondiente permiso a los Municipios. El operador privado podía cobrar a los usuarios de acuerdo a un sistema tarifario fijado por las autoridades del sector.

Adicionalmente, el gobierno creó en 1992 la SUNASS (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento), como el organismo regulador del sector. SUNASS supervisaba la calidad del servicio prestado, regulaba el sistema tarifario, realizaba las coordinaciones intersectoriales, proporcionaba los lineamientos para los planes de inversión, y supervisaba

el cumplimiento de dichas inversiones. Sin embargo, SUNASS recién comienza a operar en forma efectiva en 1994, dos años después.

Desde su creación, los criterios de la regulación tarifaria han sido de eficiencia económica, viabilidad financiera de las empresas, equidad social, simplicidad y transparencia. Con el fin de eliminar las distorsiones ocasionadas por las políticas previas de subsidios cruzados, las tarifas se fijaron de acuerdo al costo marginal de largo plazo de generar agua.

Para 1998, SUNASS había reconocido a 45 EPS operativas, incluyendo a la empresa de propiedad estatal, SEDAPAL. Las otras 44 EPS son propiedad de las municipalidades y prestan servicio a 112 provincias a lo largo del país. La mayoría de estas empresas se encontraban en una crítica situación financiera y por ello en agosto del 2000 el gobierno promulgó una nueva ley de agua potable y alcantarillado para dar solución a este problema.

Es así que el gobierno creó el Comité Especial de Promoción de la Inversión Privada del sector Saneamiento (CEPRI Saneamiento), al interior de la Comisión de Promoción de la Inversión Privada (COPRI), para promover la inversión privada en empresas municipales de agua potable.

c) Periodo posterior a las reformas

El proceso de reforma en el sector de agua potable y saneamiento ejecutado a principios de los años 1990 generaron algunos resultados interesantes. En términos de infraestructura, la cobertura del servicio de agua potable y alcantarillado se incrementó para 1998 y 1999 en 81.6% y 82.8% respectivamente. Adicionalmente, el número de conexiones instaladas en 1999 alcanzó 864,791 unidades, lo que representó un incremento de 32.2% respecto al año 1990, como se muestra en la Tabla N° 4.10.

Sin embargo, en 1999 el agua no facturada representó el 43% del total del agua producida, y el deterioro de la situación económica durante los últimos años de la década de los noventa originó un incremento de las conexiones ilegales, pero por otro lado la calidad del servicio se incrementó significativamente. En 1994, el tiempo promedio para atender un reclamo era de 14 días. Para 1999 se había reducido a 4 días. Simultáneamente, el personal en contrato permanente se había reducido a 1,562 empleados.

Las inversiones se incrementaron a un máximo de US\$ 101.5 millones en 1999, mientras las utilidades netas en el mismo año después de impuestos fueron US\$ 69,099. Finalmente el costo real promedio por metro cúbico se redujo a 0.037 soles en el año 1999. Más aún después de un periodo de deterioro de la tarifa, hubo una importante recuperación de la

tarifa comercial en 1992, año después del cual las tarifas promedio tanto para el servicio comercial como residencial mostraron un ligero incremento.

Tabla N° 4.10. Principales Indicadores del sector de agua potable y alcantarillado

	1990	1994	1998	1999
Indicadores físicos				
% de población atendida	72.59	65.57	59.51	58.72
% de cobertura de agua	75.64	74.60	81.56	82.78
% de cobertura de alcantarillado	78.10	70.90	79.90	81.00
Área servida, hectáreas	30.722	33.152	38.894	39.762
Extensión de la red de agua en kilómetros	6.527	7.121	8.464	8.652
Extensión de la red de drenaje, en kilómetros	6.130	6.746	8.033	8.203
Número de conexiones	654.140	762.929	871.723	864.791
Indicadores operativos				
Volumen producido, 000 m ³	544.730	729.292	705.298	682.509
Volumen facturado, 000 m ³	348.133	427.664	387.917	358.712
Agua facturada, %	36.09	41.40	43.00	43.00
Nivel de medición, %	56.62	47.30	40.44	
Nivel de micro-medicion, 1 %	29.01	3.50	32.21	51.02
Indicadores de Servicio				
Horas promedio de servicio de agua en la red primaria, por día	n/a	21.3	20.1	23.2
Tiempo promedio para atender reclamos, en días	n/a	14	9	4
Staff				
Staff permanente	3.481	1.901	1.555	1.562
Trabajadores por cada 1.000 conexiones	5.32	2.49	1.78	1.81
Indicadores Financieros				
Inversión, en '000 dólares	14.271	51.021	130.647	101.501
Unidades netas después de impuestos, en '000 dólares	(21.300)	68.259	75.989	69.099
Tarifa promedio agua (combinada) en soles m ³	0.09	0.67	1.20	1.37
Tarifa doméstica agua (combinada) en soles m ³	0.07	0.51	0.94	
Costo promedio por m ³ facturado	0.07	0.57	1.40	1.39
Costo promedio por m ³ producido	0.04	0.33	0.77	0.79
Tiempo promedio de cobranza, en días	116	96	132	111
Real²				
IPPM (promedio anual, 1990-base)	1.00	14.70	20.87	21.59
Tarifa promedio agua (combinado) en soles m ³	0.090	0.046	0.058	0.064
Tarifa doméstica agua (combinada) en soles m ³	0.070	0.035	0.045	
Costo Promedio por m ³ facturado	0.068	0.039	0.067	0.064
Costo promedio por m ³ producido	0.043	0.023	0.037	0.037

Notas: 1 El nivel de micro-medicion es calculado desde el año 1994 cuando SUNASS comenzó a operar. Su equivalente para los años anteriores es un porcentaje del número de conexiones facturadas con medición efectiva sobre el total de conexiones.

2 Calculado con el promedio geométrico del Índice de Precios al Por Mayor (IPPM)

Fuente: Sedapal (Anuarios Estadísticos y website).

Finalmente, si se realiza una comparación internacional, se constata que los indicadores de Sedapal se encontraban por debajo de las empresas similares en Santiago, Bogotá y Sao Paulo, como se muestra en la Tabla N° 4.11.

Tabla N° 4.11. Indicadores de gestión en otros países

Indicadores	Perú		Chile Santiago	Colombia Bogotá	Brasil Sao Paulo
	1994	1998			
Trabajadores por 1,000 conexiones	2,5	1,8	1,1	1,8	3,1
Tarifa promedio agua en US\$ m ³	0,3	0,4	n.d	0,4	0,4
Agua no facturada, %	41,4	45,0	22,0	n.d	n.d
Nivel de micromedición	3,5	32,3	n.d	n.d	n.d
Cobertura, %	74,6	84,1	100,0	94,6	90,0

Nota: n.d. = no disponible
Fuente: Sedapal, Guillermo y Dianderas, obtenido de Bonifaz (2000)

En la actualidad, según el Instituto de Economía y Desarrollo Empresarial de la Cámara de Comercio de Lima (CCL), la tarifa media de agua potable de las principales EPS de Saneamiento en el Perú están por debajo de sus costos operativos; por consiguiente, la sostenibilidad de estas empresas públicas depende de los subsidios que haga el Estado. Es así que a pesar de tener una de las tarifas de servicio de agua potable más bajas del mundo, como se muestra en la Figura N° 4.14, se cuenta con pésimos indicadores de gestión [17].

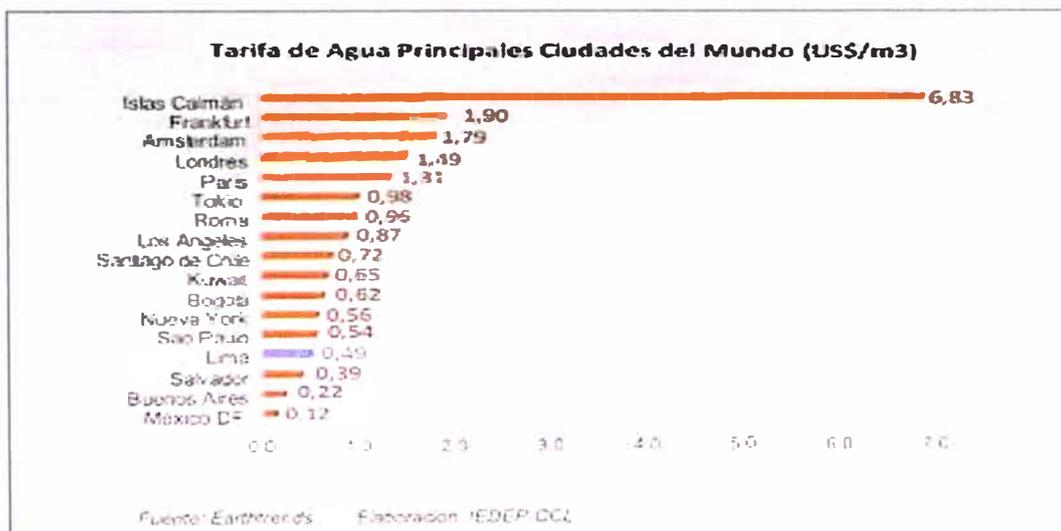


Figura N° 4.14. Tarifa de agua potable en principales ciudades del Mundo

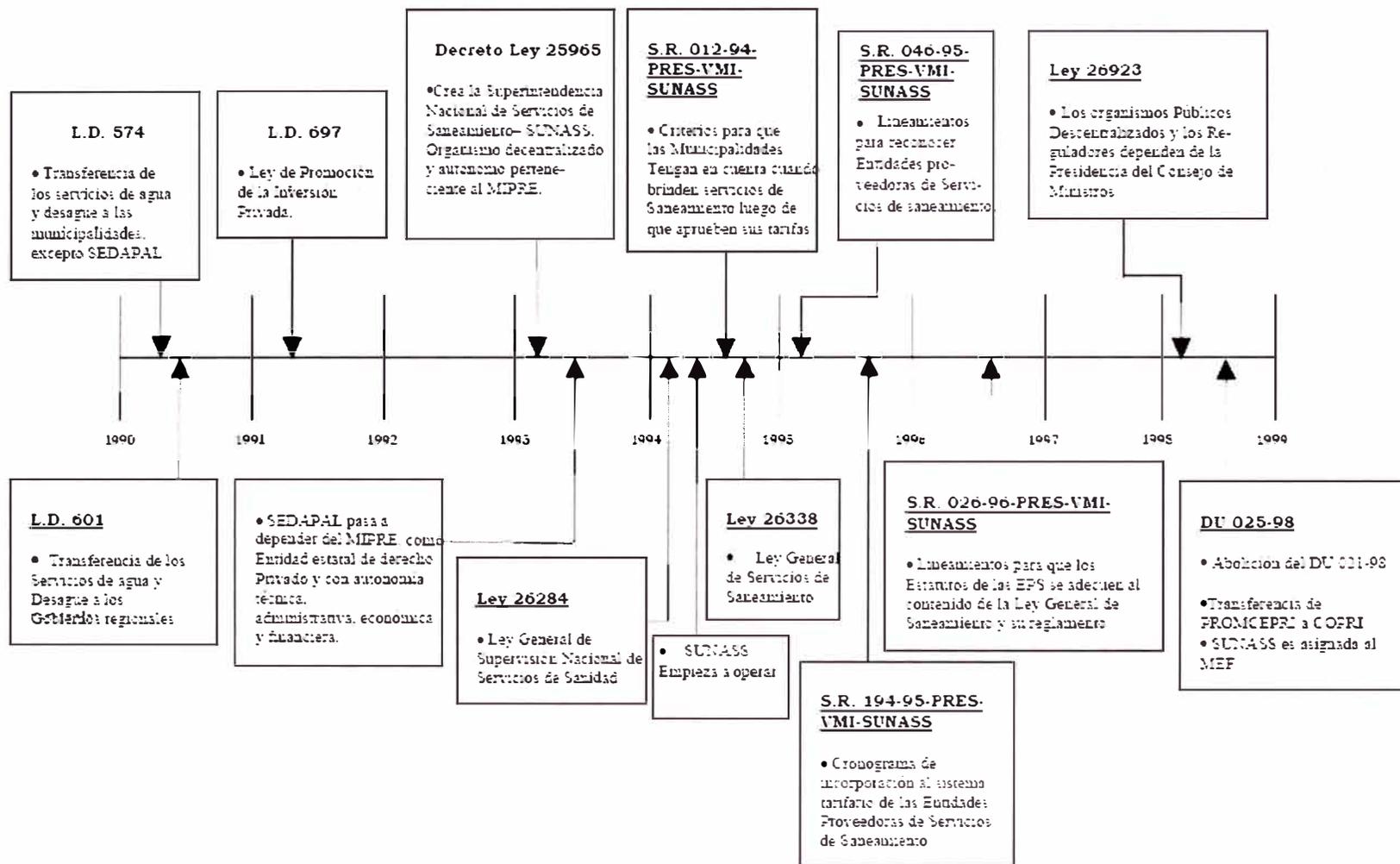


Figura N° 4.15. Principales cambios en la Legislación de Agua Potable y Saneamiento

4.7.2. Operación del Sistema de Agua Potable en Lima y Callao

Hasta las primeras décadas del siglo XX, la ciudad de Lima se abastecía con las aguas subterráneas, localizadas en lo que hoy se denomina La Atarjea. Con el paso del tiempo esto resultó insuficiente, haciéndose necesaria la utilización de las aguas superficiales del río Rímac, construyéndose para ello las primeras instalaciones de tratamiento de agua superficial.

El Servicio de Agua Potable y Alcantarillado en Lima y Callao es brindado por la empresa SEDAPAL, empresa pública de derecho privado de la Corporación FONAFE, constituida como sociedad anónima el 25 de noviembre de 1998. Tiene por objeto la prestación de los servicios de saneamiento y utilidad pública, como son:

- Servicio de Agua Potable
- Servicio de Alcantarillado
- Servicio de Disposición de Excretas
- Sistema de Letrinas y Fosas Sépticas
- Acciones de Protección al Medio Ambiente

La Atarjea, cuenta con dos bocatomas y están equipadas con rejillas para la separación del material flotante y de arrastre. La capacidad de captación es de 15 y 20 m³/s para la margen izquierda y derecha del río. Cuenta además con dos embalses reguladores uno de 500,000 m³ y otro de 1'200,000 m³ y en el exterior de la planta cuenta con 9 depósitos de regulación con una capacidad de almacenamiento de 238,000 m³, que se utilizan para atender las variaciones en la demanda de la ciudad.

4.7.3. Relación de entidades Públicas y Privadas con Sedapal

Las disposiciones aplicables a SEDAPAL como empresa del Estado y entidad prestadora de servicios de saneamiento provienen de FONAFE, SUNASS, OSCE, Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, Dirección General de Programación Multianual del Sector Público y Dirección de Crédito Público del Ministerio de Economía y Finanzas, entre otras, destacándose a las más importantes que regulan su gestión:

a) FONAFE

El Fondo Nacional de Financiamiento de la Actividad Empresarial del Estado, FONAFE, es una empresa de Derecho Público adscrita al Sector Economía y Finanzas creada por la Ley N° 27170, encargada de normar y dirigir la actividad empresarial del Estado.

FONAFE cuenta con un Directorio conformado por cinco miembros, todos ellos Ministros del Estado de los sectores: Economía y Finanzas; Transportes y Comunicaciones; Vivienda, Construcción y Saneamiento; Energía y Minas.

b) SUNASS

En 1992 se creó la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento, SUNASS, es un organismo público descentralizado, creado por Decreto Ley N° 25965, adscrito a la Presidencia del Consejo de Ministros, como el órgano regulador del sector saneamiento. SUNASS es responsable por la calidad del servicio, la regulación tarifaria, así como las coordinaciones intersectoriales, la aprobación de los planes de inversión y la supervisión de dichas inversiones.

c) OSCE

El Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado (OSCE) es la entidad encargada de velar por el cumplimiento de las normas en las adquisiciones públicas del Estado peruano. Tiene competencia en el ámbito nacional, y supervisa los procesos de contratación de bienes, servicios y obras que realizan las entidades estatales.

Es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Economía y Finanzas, con personalidad jurídica de derecho público, con autonomía técnica, funcional, administrativa, económica y financiera.

d) Ministerio de Economía y Finanzas

El Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) tiene como objetivo optimizar la actividad económica y financiera del Estado, establecer la actividad macroeconómica y lograr un crecimiento sostenido en la economía del país. Entre sus funciones tenemos:

- Planear, dirigir y controlar los asuntos relativos a la política fiscal, financiación, endeudamiento, presupuesto y tesorería.
- Planear, dirigir, controlar las políticas de la actividad empresarial financiera del Estado así como armonizar la actividad económica
- Planear, dirigir y controlar los asuntos relativos a la política arancelaria
- Administrar con eficiencia los recursos públicos del Estado

e) Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento

El 2002 se promulgó la Ley N° 27779, mediante el cual se crea el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, con el objetivo de Formular, Aprobar, Ejecutar y Supervisar las Políticas de alcance Nacional aplicables en materia de Vivienda, Urbanismo, Construcción y Saneamiento. A tal efecto dicta normas de alcance Nacional y supervisa su cumplimiento. Su competencia se extiende a las Personas Naturales y Jurídicas que realizan actividades vinculadas a los subsectores mencionados.

f) EDEGEL

Empresa de generación eléctrica, cuenta con centrales hidráulicas y térmicas. EDEGEL coordina con SEDAPAL el manejo de los embalses y lagunas en la cuenca del río Rímac, motivando reuniones frecuentes, buscando satisfacer a la población las necesidades de agua y energía eléctrica en la forma más razonable, sin afectar los intereses de ambos.

CAPITULO V

METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN

El modelo matemático que a continuación se plantea se ha resuelto en base a programación lineal y tiene como objetivo maximizar la generación hidráulica y disminuir el impacto del rebose en las centrales, embalses o cámaras de carga con la opción de adoptar en forma implícita prioridades en la asignación del agua de nuestro sistema hídrico.

Las restricciones que generalmente se presentan en el sistema hídrico donde se encuentran las centrales de generación de Edegel son:

- Las demandas de agua de parte de los regantes y la demanda de agua requerida por Sedapal para el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Lima.
- Límites por capacidad de generación.
- Limitaciones por conducción y captación en los canales y embalses respectivamente.

5.1. Modelo Matemático del problema

A continuación se plantea la función objetivo del modelo lineal y las restricciones operativas e hidráulicas consideradas en el programa computacional.

5.1.1. Función Objetivo

La función objetivo busca maximizar la generación y reducir los reboses presentados en las lagunas, embalses y centrales.

$$\max \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N P_n \cdot \Delta t - \sum_{t=1}^T \sum_{i=U} R_i \cdot \Delta t \cdot f_p^i \right\} \quad (4.1)$$

5.1.2. Restricciones

a) Capacidad de generación:

$$P_n^{\min} \leq P_n^t \leq P_n^{\max} \quad n \in C, t = 1 \dots T \quad (4.2)$$

b) Capacidad de caudales o canales:

$$Q_{i,j}^{\min} \leq Q_{i,j}^t \leq Q_{i,j}^{\max} \quad i, j \in I, t = 1 \dots T \quad (4.3)$$

c) Capacidad de embalses y/o lagunas:

$$V_k^{\min} \leq V_k^t \leq V_k^{\max} \quad k \in E, t = 1 \dots T \quad (4.4)$$

d) Rendimiento:

$$P_n^t = r_i Q_{i,j}^t \quad n \in C, t = 1 \dots T \quad (4.5)$$

e) Caudal Turbinado de la central

$$Q_{i,j}^t - \sum_{k=1}^T Q_{i,k}^t - \sum_{k=1}^T R_{i,j}^t \leq 0 \quad (4.6)$$

f) Ecuación de Balance de Caudales:

$$\sum_{j=1}^T A_{i,j} Q_{i,j}^t = \sum_{k=1}^T Q_{j,k}^t \quad t = 1 \dots T \quad (4.7)$$

g) Ecuación de Balance de Volumen:

$$V_k^t = \alpha_k V_k^{t-1} + \left(\sum_{j=1}^T A_{j,k} Q_{j,k}^t - \sum_{i=1}^T Q_{k,i}^t \right) dt \quad t = 1 \dots T \quad (4.8)$$

5.1.3. Notación

N = Número de centrales hidroeléctricas

C = Conjunto de Centrales

U = Conjunto de Embalses y Centrales

$A_{j,k}$ = Factor de pérdida en el tramo de j a k

t = Índice del periodo 1, ..., T

r_i = Rendimiento de la central i

α_k = Factor por porcentaje de evaporación en la laguna o embalse k

f_p^t = Factor de prioridad en la central o embalse i

5.1.4. Variables

P_n^t = Potencia del generador Hidroeléctrico n en el tiempo t

$Q_{i,j}^t$ = Caudal del nodo i al nodo j en el tiempo t

Qt_i^t = Caudal turbinado de la central i en el tiempo t

V_k^t = Volumen del embalse k en el tiempo t

R_i = Rebose del embalse o central $i \in U$

5.2. Método de Optimización del programa

El problema de programación lineal planteado, se resolverá utilizando el Método Primal Simplex por medio de una librería del programa optimizador ILOG CPLEX (CPXprimopt). A continuación se hará una breve descripción del programa comercial ILOG CPLEX para luego detallar las librerías utilizadas en la resolución del problema.

5.2.1. Optimizador ILOG CPLEX

El optimizador CPLEX es un programa desarrollado para resolver específicamente cualquier tipo de problema de restricción lineal, donde el objetivo a optimizar puede ser expresado como una función lineal o una función cuadrática convexa. Las variables en el modelo pueden ser declarados como valores continuos y/o valores enteros.

El programa CPLEX tiene tres opciones o caminos para resolver un problema de acuerdo a nuestras necesidades:

- **Optimizador Interactivo**, es un programa ejecutable que puede leer el problema en forma interactiva en su forma estándar, resolver el problema y arrojar la solución en forma interactiva así como de guardarlo en un archivo. El programa es el **cpflex.exe** y se puede ejecutar en plataforma Windows y UNIX.
- **Tecnología Concert**, es un conjunto de librerías implementadas en API que permiten al programador desarrollar aplicaciones en Java y C++. Está disponible en plataforma Windows y UNIX.
- **Librerías del ILOG CPLEX**, son librerías en lenguaje C que permiten al programador desarrollar aplicaciones escritos en C, Visual Basic, Fortran y cualquier otro lenguaje que tenga la opción de llamar funciones en lenguaje C. Está disponible en plataforma Windows y UNIX.

El programa ILOG CPLEX como herramienta para resolver problemas de optimización lineal necesita estar escrito de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar (o Maximizar)} && c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_nx_n \\
 &\text{Sujeto a:} && a_{11}x_1+a_{12}x_2+\dots+a_{1n}x_n \sim b_1 \\
 & && a_{21}x_1+a_{22}x_2+\dots+a_{2n}x_n \sim b_2 \\
 & && \dots \\
 & && a_{m1}x_1+a_{m2}x_2+\dots+a_{mn}x_n \sim b_m \\
 &\text{Límites:} && l_1 \leq x_1 \leq u_1, \dots, l_n \leq x_n \leq u_n
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Donde la relación \sim puede ser, mayor o igual que, menor o igual que ó simplemente igual que, los límites superiores u_i y límites inferiores l_i pueden ser valores infinitos positivos, negativos y números reales.

Dentro los problemas más básicos de programación lineal, las variables de la función objetivo son continuas en el sentido matemático, en el cual no existen saltos entre valores reales. Para resolver el problema de programación lineal, ILOG CPLEX, implementa optimizadores basado en algoritmo simplex (primal y dual simplex) así como el algoritmo de barrera logarítmica primal-dual.

ILOG CPLEX es también una herramienta para resolver problemas de programación lineal en el cual alguna o todas las variables deben asumirse valores enteros en la solución. Estos problemas se conocen como programación entera mixta o MIPs, ya que pueden combinar variables continuas y discretas.

5.2.2. Librerías del optimizador CPLEX

Los problemas de programación lineal, generalmente los más sencillos como de dos variables, se suelen resolver a través de un método geométrico; pero cuando las variables aumentan a más de dos, resulta casi imposible resolver con dicho método. Es aquí que se recurre al método Simplex, que consiste en un procedimiento algebraico iterativo, partiendo de una solución factible (un vértice de la región geométrica) y verificando sucesivamente si existe una solución mejor a la anterior, hasta llegar a la solución óptima. A continuación listamos las librerías utilizadas para la elaboración del programa [20].

a) CPXcreateprob

La rutina CPXcreateprob () crea en el entorno CPLEX el objeto del problema y define un nombre de extensión *lp*. El problema lineal creado es un problema de minimización con cero limitaciones, cero variables y una matriz de restricciones vacías. Su estructura se define como:

Definición: $lp = \text{CPXcreateprob}(\text{env}, \&\text{status}, \text{name})$

Donde:

env : Puntero del entorno CPLEX.

& status : Puntero a un entero para retorno de error o estado

name : Caracter de texto que especifica el nombre del problema inicial creado.

b) CPXprimopt

La rutina CPXprimopt () del optimizador CPLEX solo puede ser utilizado después de que se ha creado un programa lineal vía CPXcreateprob (). La rutina CPXprimopt se utiliza para encontrar la solución por el método Simplex y los resultados se registran en el objeto del problema creado. Su estructura se define como:

Status : $\text{CPXprimopt}(\text{env}, lp)$

Donde :

env : Puntero al medio CPLEX.

lp : Puntero al objeto del problema CPLEX

c) CPXgetstat

La rutina CPXgetstat () es utilizado para acceder al estado de la solución después de haber realizado la optimización lineal, entera mixta, o cuadrática. La rutina entrega el valor de 1 si la solución existe, en caso contrario puede ser 0 si la solución No Existe, el valor de 2 si la solución es inviable y 3 si no cumple los límites establecidos. Su estructura se define como:

Definición: $lpstat = \text{CPXgetstat}(\text{env}, lp)$

Donde:

env : Puntero del entorno CPLEX

lp : Puntero al objeto del problema CPLEX

d) CPXwritesol

La rutina CPXwritesol () es utilizado para escribir el archivo solución del objeto del problema. La rutina puede escribir archivos en formato texto y binario. La rutina entrega el valor de cero si no existe error, en caso contrario arroja un valor diferente a cero. Su estructura se define como:

Statuts: CPXwritesol (env, lp, name, tipo)

Donde:

env : Puntero del entorno CPLEX.

lp : Puntero al objeto del problema CPLEX.

name : Nombre de archivo donde la solución debería escribirse.

tipo : Tipo de archivo 'TXT', 'BIN' ó NULL.

5.3. Implementación del programa

El programa se implementó en un lenguaje de programación Visual Basic 6.0 con la opción de importar datos desde una plantilla Excel para ingresar los datos de afluentes y demanda de agua ya sea para riego o agua potable.

A continuación se detallará los objetos creados para modelar los agentes involucrados en un sistema hídrico que nos compete.

5.3.1. Objeto Afluente

Cuando el objeto “**Afluente**” recibe la instrucción de click derecho, se visualiza una ventana de propiedades como se muestra en la Figura N° 5.1 y tiene las siguientes características:

- Nombre Afluente: Nombre del objeto
- Nombre Campo: Campo del archivo importado para guardar en memoria.
- Data Inicio: Mes de inicio del registro importado y filtrado. Se considera que los meses están en el rango de 1 y 12.
- Data Final: Mes de fin del registro importado y filtrado. Se considera que los meses están en el rango de 1 y 12.

5.3.2. Objeto Embalse o Toma

Cuando el objeto “**Embalse o Toma**” recibe la instrucción de click derecho, se visualiza una ventana de propiedades como se muestra en la Figura N° 5.2 y tiene las siguientes características:

- Volumen Máximo: Límite superior del volumen embalsado.
- Volumen Mínimo: Límite inferior del volumen embalsado.
- Volumen Inicial: Volumen inicial del periodo de estudio.
- Volumen Final: Opcional, se define un volumen final al final del periodo de estudio.
- Evaporación: Porcentaje de evaporación en el embalse o toma.
- Corrección mensual de evaporación: Factor de corrección en el porcentaje de evaporación.
- Nombre de Embalse: Nombre del objeto embalse.

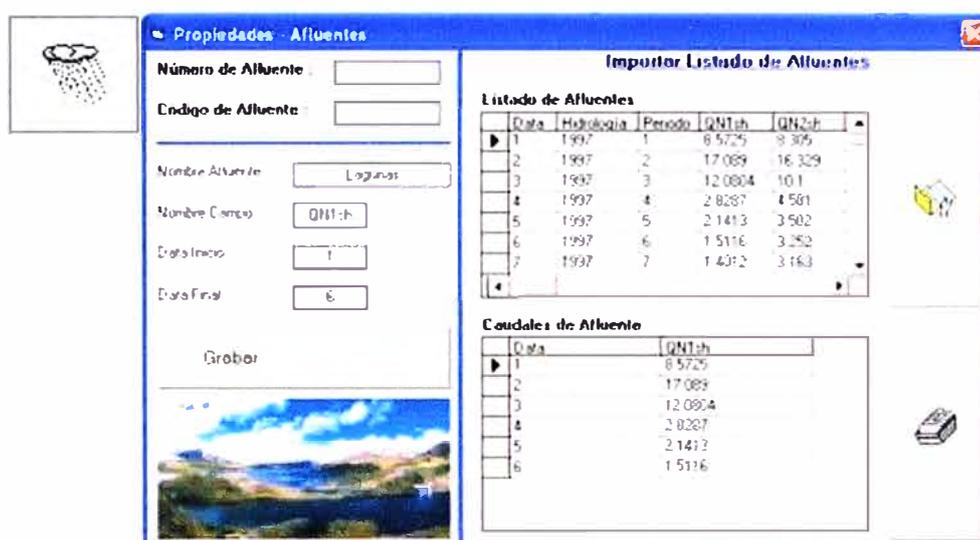


Figura N° 5.1 Ventana de propiedades del objeto Afluente.

5.3.3. Objeto Central Hidráulica

Cuando el objeto “Central Hidráulica” recibe la instrucción de click derecho, se visualiza una ventana de propiedades como se muestra en la Figura N° 5.3 y tiene las siguientes características:

- Potencia Efectiva: Potencia efectiva de la central hidráulica.
- Rendimiento: Rendimiento de la central hidráulica.
- Caudal Máximo: Caudal máximo turbinado por la central.
- Potencia Máxima: Potencia máxima de la central hidráulica.
- Potencia Mínima: Potencia mínima de la central hidráulica.
- Nombre Central: Nombre de la central hidráulica.

Figura N° 5.2. Ventana de propiedades del objeto Embalses.



Figura N° 5.3. Ventana de propiedades del objeto Centrales.

5.3.4. Objeto Demandante de Agua

Cuando el objeto “Demandante de Agua” recibe la instrucción de click derecho, se visualiza una ventana de propiedades como se muestra en la Figura N° 5.4 y tiene las siguientes características:

- Nombre Regante: Nombre del objeto.
- Nombre Campo: Campo del archivo importado para guardar en memoria.
- Data Inicio: Mes de inicio del registro importado y filtrado. Se considera que los meses están en el rango de 1 y 12.
- Data Final: Mes de fin del registro importado y filtrado. Se considera que los meses están en el rango de 1 y 12.

5.3.5. Objeto Canal o Trayectoria

Cuando el objeto “Canal o Trayectoria” recibe la instrucción de click derecho, se visualiza una ventana de propiedades como se muestra en la Figura N° 5.5 y tiene las siguientes características:

- Caudal Máximo: Caudal de conducción máxima en el canal o trayectoria.
- Caudal Mínimo: Caudal de conducción mínima en el canal o trayectoria.
- Tiempo Llegada: Tiempo de desfase entre el punto de inicio y fin.

- Pérdida de Caudal: Porcentaje de pérdida de caudal en el canal o trayectoria.
- Nombre de Canal: Nombre del canal o trayectoria.

Data	Año	Mes	Q01:ch	Q02:ch
1	1965	Enero	6.0434	4.1844
2	1965	Febrero	14.5257	14.8861
3	1965	Marzo	12.4307	13.1497
4	1965	Abril	5.3311	5.552
5	1965	Mayo	3.4784	4.6851
6	1965	Junio	1.2178	3.1651
7	1965	Julio	1.2178	3.1651

Data	Sedapal
1	20
2	20
3	20
4	20
5	20
6	20
7	20
8	20
9	20

Figura N° 5.4. Ventana de propiedades del objeto Demandante de agua.

Nº	Hr(i-t)	Q0(i-t)
1	0	25

Figura N° 5.5. Ventana de propiedades del objeto Canal de Trayectoria.

5.4. Aplicación al problema

El problema de optimización lineal tiene como objetivo optimizar la generación hidráulica y reducir las pérdidas ó reboses en los distintos embalses y centrales hidráulicas. Una vez realizado esto, se obtiene además como resultado el manejo o plan de descarga en las distintas lagunas y embalses en el periodo de estudio.

Esto no sería posible si previamente no definimos ciertos criterios o suposiciones que definen el comportamiento del sistema. Ya que no es lo mismo tener un plan de manejo de la cuenca en condiciones hidrológicas favorables (año húmedo) que en condiciones hidrológicas escasas (año seco). A esto se suma en forma análoga, cuando tenemos diferentes niveles de demanda de agua, como el requerido para el consumo humano.

Por lo mencionado, en este capítulo procederemos a resolver el problema de optimización lineal tomando como referencia un año hidrológico promedio y teniendo en consideración las siguientes suposiciones o condiciones:

- Año hidrológico promedio, se tomará como referencia el año 2003 por presentar un porcentaje de excedencia (porcentaje de escasez hidrológica) casi igual al 50% en la cuenca del río Rímac, como se observa en la Tabla N° 5.1.
- Las condiciones iniciales de las lagunas y embalses son lo ocurrido en el año hidrológico de referencia 2003, como se muestra en la Tabla N° 5.2.
- La matriz de caudales naturales y afluentes se tomaron como referencia del estudio de naturalización de caudales informado por Edegel al COES para el estudio de Fijación Tarifaria Eléctrica.

La Tabla N° 5.1 se obtuvo convirtiendo a volumen los caudales naturalizados de las subcuencas pertenecientes al río Rímac, luego se calculó el volumen embalsado en todo el año y se obtuvo los datos mostrados en la columna "Volumen" de la tabla anterior, finalmente este valor se ordena de mayor a menor volumen embalsado, logrando así un porcentaje de excedencia hidrológica en función a la cantidad de datos de hidrología que se cuenta.

A continuación detallaremos las características de nuestro modelo hídrico que representará a la cuenca del Rímac asociado a todos los agentes hidroenergéticos, como los embalses y afluentes, los canales y trayectorias, las centrales hidroeléctricas y los demandantes de agua como los regantes y la planta destinado al servicio de agua potable para la ciudad de Lima.

Tabla N° 5.1. Porcentaje de Excedencia Hidrológica

Orden	Año	Volumen Mio m ³	Excedencia	Hidrología
1	1973	1,181	2%	Año Húmedo
2	1984	1,126	5%	
3	2001	1,121	7%	
4	1994	1,104	9%	
5	2000	1,102	12%	
6	1986	1,089	14%	
7	1972	1,036	16%	
8	1981	1,002	19%	
9	1989	998	21%	Año Semi Húmedo
10	1999	974	23%	
11	1993	969	26%	
12	2007	962	28%	
13	1967	932	30%	
14	2006	930	33%	
15	1974	927	35%	
16	1982	895	37%	
17	1998	893	40%	Año Promedio
18	1971	888	42%	
19	1976	883	44%	
20	1970	882	47%	
21	2003	870	49%	
22	2002	870	51%	
23	1985	857	53%	
24	1987	852	56%	
25	1996	848	58%	
26	1988	832	60%	Año Seco
27	1975	816	63%	
28	1977	807	65%	
29	1979	777	67%	
30	2005	764	70%	
31	1978	757	72%	
32	1997	736	74%	
33	1980	727	77%	
34	1966	718	79%	Año Extremadamente Seco
35	2004	714	81%	
36	1991	712	84%	
37	1983	673	86%	
38	1995	646	88%	
39	1969	643	91%	
40	1965	627	93%	
41	1990	598	95%	
42	1968	521	98%	
43	1992	454	100%	

Tabla N° 5.2. Volumen inicial en lagunas y embalses - Año 2003

2003	Volumen Inicial Millones m ³	Volumen Máximo Millones m ³	% Embalse
QUISHA	1.975	8.70	23%
CARPA	3.030	17.80	17%
HUASCA	4.760	6.30	76%
SACSA	7.050	16.20	44%
QUIULA	0.440	1.90	23%
PITICULI	3.530	6.50	54%
HUAMPAR	0.975	3.30	30%
HUACHUA	1.920	5.10	38%
PIRHUA	0.846	0.90	94%
MANCA	0.834	1.60	52%
CHICHE	1.050	2.30	46%
CANCHIS	1.355	2.10	65%
HUALLUNCA	1.110	1.60	69%
MISHA	0.290	0.70	41%
PUCRO	1.242	2.00	62%
ANTACOTO	85.02	120.00	71%
MARCACOCHA	10.37	10.70	97%
MARCAPOMACOCHA	7.77	14.80	53%
SANGRAR	3.98	8.80	45%
TUCTO	1.33	2.75	48%
YURACMAYO	16.86	48.30	35%
TOTAL	155.74	282.35	

5.4.1. Sistema de afluentes y embalses

El sistema hídrico de Edegel se puede simplificar y representar en 3 subsistemas de lagunas y embalses como sigue:

- Subsistema lado Pacífico: Se ubican 15 embalses en la vertiente del pacífico.
- Subsistema lado Atlántico: Se ubican 5 embalses en la vertiente del atlántico.
- Subsistema Yuracmayo: Se ubica únicamente el embalse Yuracmayo.

Las lagunas y embalses de cada subsistema tienen asociado una matriz de caudales naturales llamados también afluentes. En la Tabla N° 5.3 se detalla las matrices de afluentes de cada laguna y embalse para el año hidrológico 2003, mientras que en el Anexo 1 se presenta un cuadro con las principales características hidráulicas de cada laguna y embalse.

Tabla N° 5.3. Afluentes de Lagunas y Embalses - Hidrología 2003 (m³/s)

Laguna	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Quisha	0.262	0.450	0.212	0.283	0.069	0.017	0.031	0.051	0.037	0.070	0.199	0.325
Carpa	0.239	0.234	0.326	0.206	0.107	0.040	0.000	0.000	0.015	0.053	0.000	0.017
Huasca	0.221	0.227	0.220	0.170	0.037	0.053	0.032	0.091	0.009	0.000	0.000	0.243
Sacsá	1.418	1.134	1.320	0.502	0.154	0.080	0.088	0.097	0.123	0.095	0.115	1.005
Quiula	0.151	0.117	0.204	0.111	0.004	0.005	0.010	0.016	0.030	0.048	0.108	0.046
Piticuli	0.179	0.152	0.329	0.204	0.078	0.066	0.012	0.011	0.024	0.039	0.033	0.034
Huampar	0.310	0.387	0.315	0.135	0.058	0.035	0.018	0.010	0.040	0.113	0.069	0.162
Huachua	0.071	0.305	0.470	0.312	0.000	0.000	0.000	0.006	0.128	0.000	0.000	0.000
Chiche	0.194	0.166	0.177	0.115	0.053	0.017	0.047	0.042	0.010	0.052	0.043	0.082
Pucro	0.000	0.029	0.029	0.046	0.056	0.000	0.005	0.000	0.026	0.000	0.000	0.007
Misha	0.121	0.239	0.106	0.217	0.049	0.008	0.010	0.018	0.008	0.014	0.054	0.031
Canchis	0.365	0.098	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.272	0.136	0.015	0.152
Huallunca	0.215	0.345	0.331	0.235	0.013	0.015	0.023	0.028	0.014	0.031	0.049	0.099
Pirhua	0.076	0.061	0.088	0.063	0.012	0.000	0.003	0.003	0.002	0.003	0.008	0.048
Manca	0.206	0.133	0.106	0.178	0.077	0.058	0.028	0.013	0.009	0.025	0.007	0.101
Antacoto	2.179	3.436	1.380	0.424	0.570	1.362	1.105	0.511	1.254	3.154	0.695	1.301
Marcacocha	0.178	0.373	0.535	0.257	0.149	0.108	0.071	0.020	0.015	0.027	0.232	0.733
Marcapomacocha	2.885	4.643	7.345	4.278	3.113	2.872	3.082	3.665	1.698	3.118	1.870	3.413
Sangrar	0.298	0.451	0.488	0.519	0.124	0.194	0.348	0.037	0.019	0.046	0.013	0.327
Tucto	0.301	0.115	0.189	0.326	0.492	0.082	0.033	0.026	0.045	0.019	0.017	0.356
Yuracmayo	2.453	2.695	5.147	1.940	1.250	0.670	0.451	0.379	0.450	0.425	0.650	2.601
Tamboraque	16.655	18.705	27.253	18.725	12.749	9.083	7.537	6.444	6.186	6.241	6.621	11.439
Qno_embalsado	14.906	16.400	18.832	12.519	5.612	3.191	2.529	1.331	1.912	3.714	1.485	6.411
Marca_III	2.338	4.032	1.386	0.607	1.081	0.258	0.121	0.154	0.182	0.543	0.127	0.714

Del informe de naturalización de caudales [19], los afluentes para los embalses en serie o cascada, el aporte independiente de cada uno, se calculó como la diferencia del caudal naturalizado del embalse menos el caudal naturalizado del embalse aguas arriba.

5.4.2. Sistema de centrales hidráulicas

En la Tabla N° 5.4 se listan las características de cada central hidráulica del sistema.

5.4.3. Sistema de demandantes de agua

En la Tabla N° 5.5 se listan las características de cada demandante de agua del sistema.

Tabla N° 5.4. Datos de las centrales hidráulicas

	Potencia Efectiva	Rendimiento	Caudal Máximo
	MW	MW/(m ³ /s)	m ³ /s
Huinco	247.3	9.892	25.0
Matucana	128.6	8.689	14.8
Callahuanca	80.4	3.922	20.5
Moyopampa	64.7	3.6971	17.5
Huampaní	30.2	1.6324	18.5

Tabla N° 5.5. Datos de los demandantes de agua (m³/s)

Demandantes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Regante 1	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823
Regante 2	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506
Regante 3	0.2438	0.2438	0.2438	0.2438	0.2438	0.2438	0.2438	0.2438	0.2438	0.2438	0.2438	0.2438
Regante 4	0.1556	0.1556	0.1556	0.1556	0.1556	0.1556	0.1556	0.1556	0.1556	0.1556	0.1556	0.1556
Regante 5	0.0994	0.0994	0.0994	0.0994	0.0994	0.0994	0.0994	0.0994	0.0994	0.0994	0.0994	0.0994
Regante 6	0.4687	0.4687	0.4687	0.4687	0.4687	0.4687	0.4687	0.4687	0.4687	0.4687	0.4687	0.4687
Sedapal	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20

5.4.4. Sistema de canales y trayectorias

El sistema hídrico de simulación cuenta con un sistema de canales y trayectorias que sirven para comunicar los distintos agentes de nuestro sistema. En el Anexo 2 se detalla las principales características del sistema de canales y trayectorias.

Los límites de conducción en los canales y trayectorias, se realizó en base a la máxima apertura de compuertas para el caso de los embalses, mientras que para los canales o tuberías forzadas se colocó según a su diseño y finalmente las trayectorias de los ríos o afluentes se consideró un valor "infinito", de forma de relajar el problema de optimización y que el programa elija la forma óptima.

El problema planteado se desarrolló de forma tal que no exista pérdidas en la conducción del caudal y por ser una simulación de forma mensual, los tiempos de respuesta entre nodo y nodo se consideró como valor cero por ser despreciable.

Tabla N° 5.7. Límite de caudal en trayectorias (m^3/s)

Inicio	Fin	Caudal máximo (m^3/s)
Quisha	Carpa	5.73
Carpa	Huasca	5.68
Huasca	Sheque	5.58
Sacsá	Sheque	5.32
Quiula	Sheque	3.44
Piticuli	Sheque	5.78
Huampar	Huachua	5.80
Huachua	Sheque	6.92
Chiche	Pucro	5.64
Ppucro	Canchis	5.86
Misha	Canchis	4.17
Canchis	Sheque	5.84
Huallunca	Sheque	6.44
Pirhua	Manca	5.50
Manca	Sheque	7.06
Antacoto	Marcapomacocha	12.31
Marcacocha	Marcapomacocha	3.25
Marcapomacocha	Sheque	10.50
Ssangrar	Sheque	9.35
Ttucto	Sheque	3.00
Yuracmayo	Tamboraque	9.15

En la Tabla N° 5.7 se muestra el caudal máximo descargado entre lagunas. Los límites en las tuberías forzadas se mostraron en la Figura N° 4.13 del capítulo IV, y el límite de los afluentes a los embalses así como las trayectorias por reboses, se toma como valor de 100.

5.4.5. Consideraciones al problema planteado.

La simulación se desarrolló en base al diagrama mostrado en el Anexo 3, en este se encuentran los sistemas descritos anteriormente, con las siguientes consideraciones:

- La simulación se realizó en el periodo de un año en forma mensual.
- La información hidrológica de los embalses y lagunas se extrajeron del informe de naturalización de caudales [19], presentados por EDEGEL al COES.
- Se considera que el nivel de volumen inicial en lagunas y embalses es igual al volumen final al fin del periodo de estudio, esto se hizo para ver el manejo de las lagunas y

embalses para una matriz de afluentes, correspondiente a un año hidrológico, que en este caso será el año 2003.

- Los niveles de cámara de carga de las centrales de pasada y regulación se consideró que en todo el periodo de estudio se mantiene constante, ya que en el periodo mensual no se notaría su efecto, por operar como pequeños embalses de regulación diaria y horaria.
- En caso que el modelo no converge, se debe tomar la decisión de alcanzar un volumen final menor al volumen inicial de los embalses o disminuir el nivel exigido en la Planta Atarjea requerido por Sedapal.

CAPITULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Análisis de resultados

A continuación se presenta los resultados del problema planteado en el capítulo IV. Se empezará a analizar cada agente que integra nuestro sistema hidráulico.

6.1.1. Planta Atarjea

La planta Atarjea está representada en el modelo según el Anexo 3 en referencia a las Figuras N° 4.9 y 4.13, de modo tal que reciba el aporte del caudal rebosado en la cámara de carga de Huampaní y el aporte que resulta de la unión del río Rímac y del caudal turbinado en la central Huampaní, en la Tabla N° 6.1 se detalla el aporte de cada uno de ellos.

Tabla N° 6.1. Caudal recibido en la planta Atarjea (m³/s)

	Em030_Em031 Taza Huampani	Ch005_Em031 Central Huampani	Em031_Rg001 Sedapal
Enero	4.8	30.0	34.8
Febrero	19.5	18.5	38.0
Marzo	21.0	30.0	51.0
Abril	0.1	30.0	30.1
Mayo	0.0	23.4	23.4
Junio	0.0	20.3	20.3
Julio	1.8	18.5	20.3
Agosto	0.0	20.3	20.3
Septiembre	1.8	18.5	20.3
Octubre	0.0	20.3	20.3
Noviembre	1.8	18.5	20.3
Diciembre	1.8	18.5	20.3

Se simuló aumentando el caudal de captación de la planta Atarjea hasta obtener una limitación de convergencia en el modelo y se obtuvo que en promedio el caudal máximo recibido por la planta sería de 20.3 m³/s en el periodo de estiaje, como se muestra en la Figura N° 6.1, esto solo se cumple si mantenemos todas las hipótesis antes mencionados.

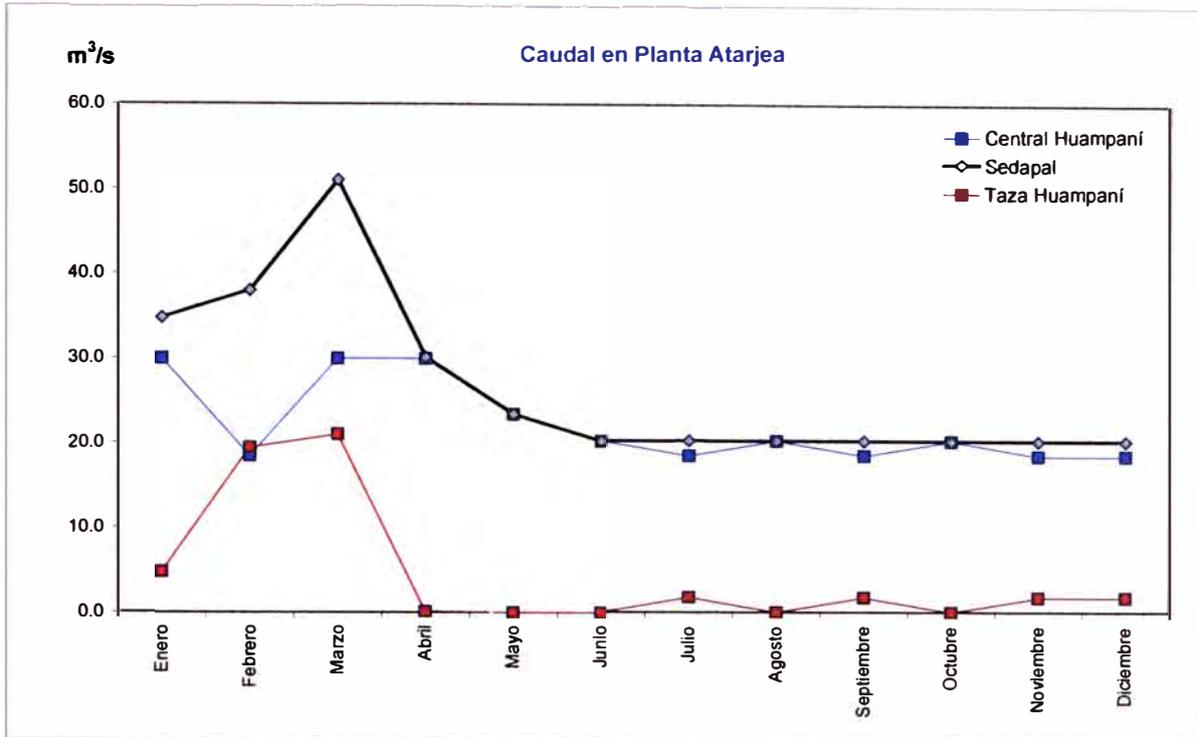


Figura N° 6.1. Caudal en la planta Atarjea (m³/s)

6.1.2. Centrales Hidráulicas

En la Tabla N° 6.2 se observa como era de esperar, que las centrales hidráulicas de pasada se encuentran despachando a su potencia efectiva máxima, mientras que las de regulación no tienen un despacho constante sino más bien regulan su potencia en función al nivel de su embalse asociado.

Tabla N° 6.2. Potencia Media de Centrales Hidráulicas (MW)

	Pt001 Huinco	Pt003 Matucana	Pt002 Callahuanca	Pt004 Moyopampa	Pt005 Huampaní
Enero	190	129	80	65	30
Febrero	203	129	80	65	30
Marzo	247	129	80	65	30
Abril	125	129	80	65	30
Mayo	105	120	80	65	30
Junio	116	83	80	65	30
Julio	134	67	80	65	30
Agosto	86	109	80	65	30
Septiembre	104	93	80	65	30
Octubre	151	52	80	65	30
Noviembre	104	93	80	65	30
Diciembre	89	106	80	65	30

En la Figura N° 6.2, se muestra de forma clara lo anteriormente mencionado.

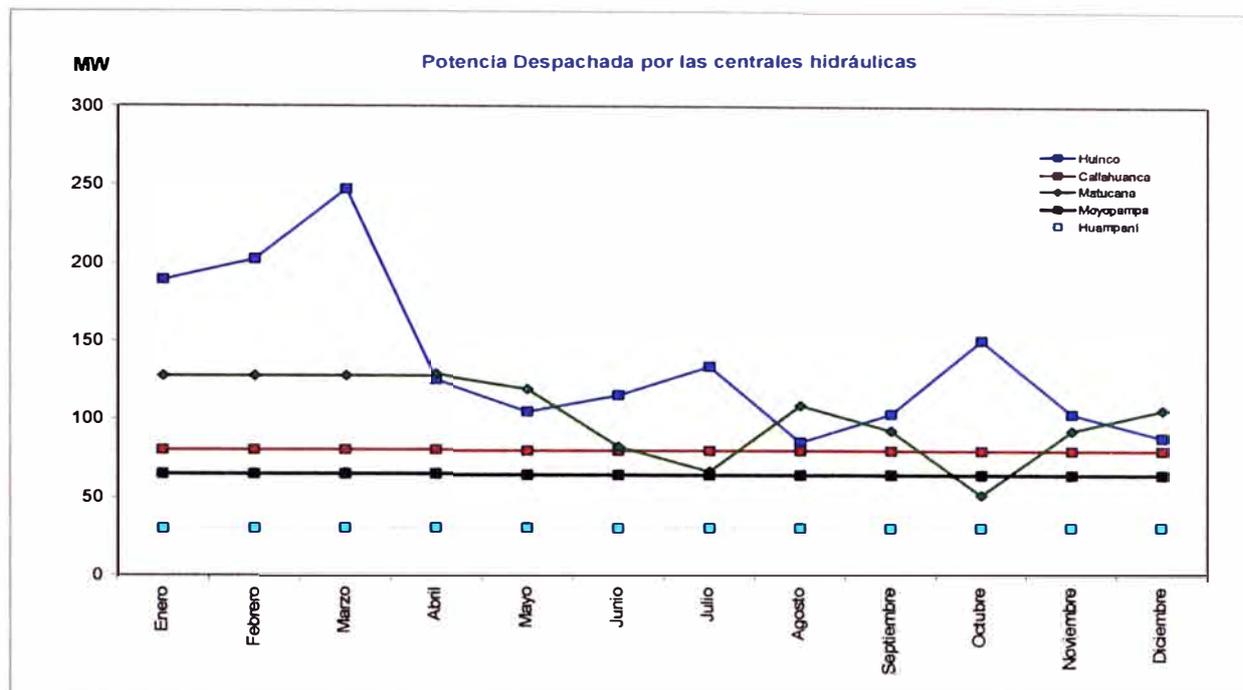


Figura N° 6.2. Potencia Media de centrales hidráulicas (MW)

6.1.3. Embalses y Lagunas

El nivel de volumen en las lagunas tienen un comportamiento periódico de embalse y descarga en el año, embalsa en periodo de avenida y desembalsa o descarga en estiaje, como se observa en la Tabla N° 6.3.

Tabla N° 6.3. Volumen embalsado en las subcuencas del río Rímac

	Volumen Total (Millones m ³)			
	Pacífico	Atlántico	Yuracmayo	Total
Enero	30.41	108.47	16.86	155.74
Febrero	34.12	119.48	22.97	176.57
Marzo	43.25	132.45	29.49	205.19
Abril	53.57	141.92	43.27	238.76
Mayo	60.21	156.77	48.30	265.28
Junio	61.17	157.05	48.30	266.52
Julio	49.71	156.12	48.30	254.12
Agosto	38.10	148.45	48.30	234.85
Septiembre	29.55	148.56	32.28	210.40
Octubre	29.17	133.43	21.11	183.72
Noviembre	27.99	115.29	22.25	165.53
Diciembre	29.64	97.13	12.67	139.44

En la Figura N° 6.3 se logra observar que este comportamiento se presenta en las tres subcuencas que aportan al río Rímac.

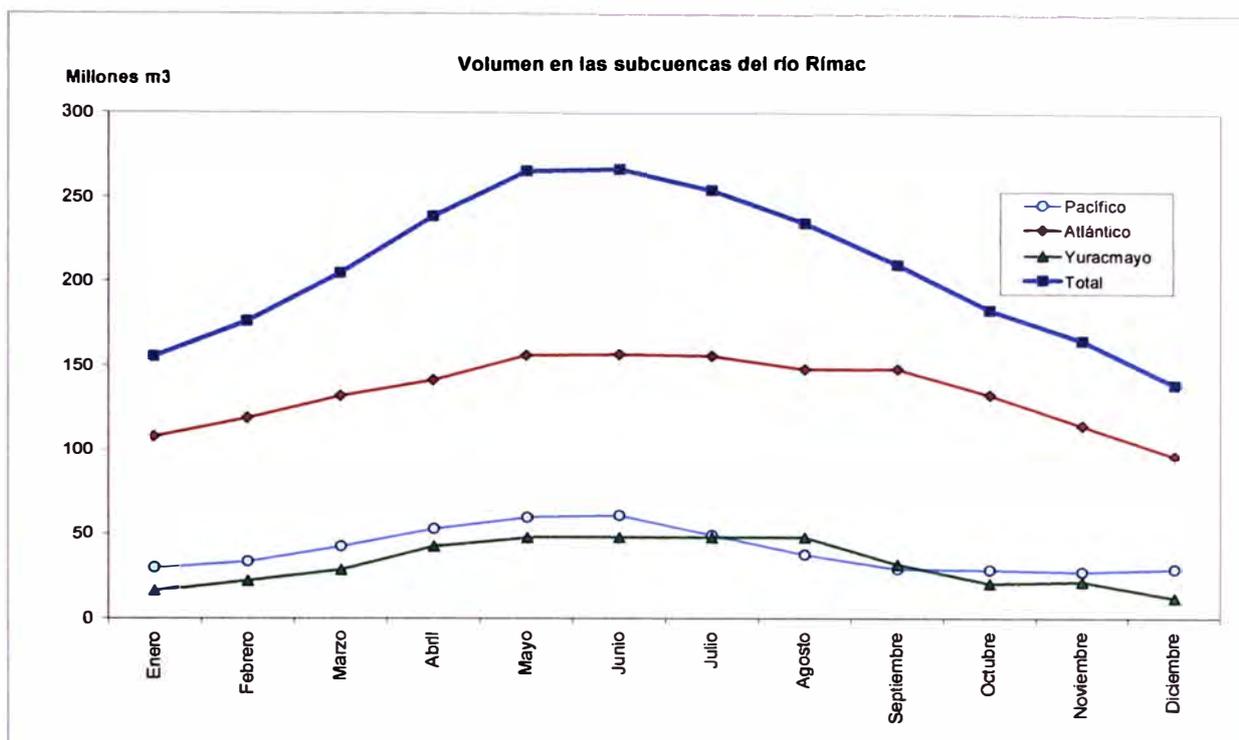


Figura N° 6.3. Curva de Volumen de Lagunas y Embalses

A continuación en la Tabla N° 6.4 se detalla la salida del modelo respecto al volumen embalsado en cada laguna.

Tabla N° 6.4. Comportamiento del volumen embalsado por Laguna (Millones m³)

Inicios de Mes	Ene-03	Feb-03	Mar-03	Abr-03	May-03	Jun-03	Jul-03	Ago-03	Sep-03	Oct-03	Nov-03	Dic-03	Fin Dic-03
Quiula	0.44	0.78	1.07	1.61	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	0.00	0.13	0.41	0.44
Sacsá	7.05	8.62	11.36	14.90	16.20	16.20	10.85	3.23	3.49	3.80	4.06	4.36	7.05
Piticulí	3.53	4.01	4.38	5.26	5.79	5.99	6.16	6.20	3.19	3.25	3.35	3.44	3.53
Quisha	1.98	2.68	3.77	4.33	0.00	0.19	0.23	0.31	0.31	0.40	0.59	1.10	1.98
Carpa	3.03	3.67	4.24	5.11	10.71	10.99	11.10	2.66	2.80	2.84	2.98	2.98	3.03
Huasca	4.76	4.72	5.27	5.86	6.30	6.30	0.00	6.30	6.28	6.30	4.43	4.43	4.76
Chiche	1.05	1.13	1.53	2.00	2.30	2.30	2.30	2.30	2.27	2.30	0.72	0.83	1.05
Pucro	1.24	1.68	1.76	1.83	1.95	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	1.22	1.22	1.24
Misha	0.29	0.61	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.47	0.03	0.07	0.21	0.29
Canchis	1.36	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	0.00	0.00	1.24	2.10	2.10	1.36
Manca	0.83	0.33	0.65	0.93	1.39	1.60	1.52	1.60	1.58	1.60	0.54	0.56	0.83
Huachua	1.92	1.66	3.03	4.29	5.10	5.10	5.05	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	1.92
Huallunca	1.11	0.00	0.83	0.99	1.60	1.60	1.60	1.60	1.48	1.52	1.60	1.60	1.11
Pirhua	0.85	0.32	0.47	0.71	0.87	0.90	0.89	0.90	0.68	0.69	0.70	0.72	0.85
Huampar	0.98	1.80	2.11	2.95	3.30	3.30	3.30	3.30	0.00	0.10	0.41	0.58	0.98
Tucto	1.33	1.12	1.40	1.91	2.75	2.75	2.75	2.75	0.16	0.28	0.33	0.38	1.33
Marcapomacocha	103.2	113.6	125.2	132.8	145.5	145.5	145.5	136.9	145.5	130.2	111.9	93.7	103.2
Sangrar	3.98	4.78	5.87	7.18	8.52	8.80	7.87	8.80	2.90	2.95	3.07	3.11	3.98
Yuracmayo	16.86	22.97	29.49	43.27	48.30	48.30	48.30	48.30	32.28	21.11	22.25	12.67	16.86

De igual manera se muestra en la Tabla N° 6.5 el caudal descargado por las lagunas, donde se observa que el mayor nivel de descarga ocurre en el periodo de estiaje.

Tabla N° 6.5. Caudal descargado en lagunas y embalses (m³/s)

	Ene-03	Feb-03	Mar-03	Abr-03	May-03	Jun-03	Jul-03	Ago-03	Sap-03	Oct-03	Nov-03	Dic-03
Quiula	0.02				0.00	0.01	0.01	0.02	0.76			0.03
Sacsa	0.83				0.15	2.15	2.93					
Piticuli								1.13				
Quisha				1.95				0.05				
Carpa							3.15					
Huasca	0.23				0.04	2.48	0.83	0.10		0.70		0.12
Chiche	0.17				0.05	0.02	0.05	0.05		0.64		
Pucro					0.09	0.02	0.05	0.80	0.03	0.19		
Misha		0.20	0.11	0.22	0.05	0.01	0.01	0.10	0.18			
Canchis	0.09	0.30	0.11	0.22	0.14	0.03	0.85	0.90			0.02	0.43
Manca	0.67					0.09		0.11		0.42		
Huachua	0.17				0.06	0.05		1.25	0.13			1.20
Huallunca	0.63		0.27		0.01	0.02	0.02	0.07			0.05	0.28
Pirhua	0.27					0.00		0.08				
Huampar		0.26			0.06	0.04	0.02	1.24				0.02
Tucto	0.38				0.49	0.08	0.03	0.99				
Marcapomacocha	1.33	3.88	5.87		4.19	3.13	6.41	0.61	7.78	10.50	9.03	0.58
Sangrar					0.02	0.55		2.24				
Yuracmayo	0.17				1.25	0.67	0.45	6.36	4.76		4.35	1.04

6.1.4. Regantes

En el modelo realizado se consideró a los regantes como los demandantes de agua que obtienen un caudal constante en todo el periodo de estudio, como se muestra en la Tabla N° 6.6, la fuente de esta información está en base a la relación de usuarios con acuerdos para captar agua de los excedentes provenientes de las instalaciones de Edegel. Ver Anexo 4.

Tabla 6.6. Caudal demandado por los regantes (m³/s)

Regantes	Em018_Rg002 Sheque	Em027_Rg008 Tamboraque	Em025_Rg003 Callahuanca 1	Em025_Rg004 Callahuanca 2	Em029_Rg006 Moyopampa	Em030_Rg007 Huampaní	Em031_Rg001 Atarjea
Enero	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	40.302
Febrero	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	48.568
Marzo	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	56.983
Abril	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	29.200
Mayo	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	29.200
Junio	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	29.200
Julio	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	29.200
Agosto	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	29.200
Septiembre	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	29.200
Octubre	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	29.200
Noviembre	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	29.200
Diciembre	0.082	0.244	0.251	0.156	0.099	0.469	29.200

6.2. Sensibilidades con diferentes escenarios hidrológicos

A continuación se presentarán los resultados obtenidos con el modelo desarrollado, para escenarios con hidrología húmeda y seca.

6.2.1. Análisis con año hidrológico húmedo.

En base a la Tabla N° 5.1 se toma como año hidrológico húmedo el año 2000. Las condiciones iniciales de las lagunas se muestran en la Tabla N° 6.8.

Tabla N° 6.8. Volumen inicial de lagunas y embalses (Millones m³)

2000	Volumen Inicial Millones m ³	Volumen Máximo Millones m ³	% Embalse
QUISHA	0.55	8.70	6%
CARPA	0.00	17.80	0%
HUASCA	1.41	6.30	22%
SACSA	2.75	16.20	17%
QUIULA	0.00	1.90	0%
PITICULI	0.00	6.50	0%
HUAMPAR	1.23	3.30	37%
HUACHUA	0.00	5.10	0%
PIRHUA	0.57	0.90	63%
MANCA	0.36	1.60	23%
CHICHE	0.45	2.30	19%
CANCHIS	0.53	2.10	25%
HUALLUNCA	0.00	1.60	0%
MISHA	0.39	0.70	55%
PUCRO	0.00	2.00	0%
ANTACOTO	61.29	120.00	51%
MARCACOCHA	3.73	10.70	35%
MARCAPOMACOCHA	2.98	14.80	20%
SANGRAR	1.64	8.80	19%
TUCTO	1.11	2.75	40%
YURACMAYO	19.93	48.30	41%
TOTAL	98.92	282.35	35%

Se empezará a simular el problema con un caudal inicial demandado en la atarjea hasta lograr obtener el nivel de caudal máximo permisible, manteniendo los volúmenes de los embalses iguales al inicio y fin del periodo. Las demás variables como potencia efectiva, rendimientos, límites de embalses se mantienen constantes, con el fin de observar el efecto de los afluentes y los niveles inicial de volumen. En la Tabla N° 6.9 se muestran los afluentes de los embalses en el año 2000.

Se tomó la data histórica del año 2000 en base al informe de naturalización de caudales del río Rímac emitida al COES por la empresa Edegel.

Tabla N° 6.9. Afluentes de lagunas y embalses – hidrología 2000 (m³/s)

Laguna	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qulsha	0.330	0.265	0.269	0.482	0.033	0.028	0.016	0.018	0.066	0.109	0.023	0.047
Carpa	0.530	0.402	0.369	0.592	0.049	0.030	0.019	0.020	0.035	0.036	0.178	0.250
Huesca	0.336	0.242	0.587	0.433	0.019	0.016	0.277	0.005	0.000	0.000	0.001	0.221
Sacsa	2.499	1.365	1.567	0.521	0.319	0.118	0.013	0.013	0.203	0.057	0.071	0.643
Quluta	0.190	0.153	0.194	0.246	0.013	0.008	0.005	0.008	0.011	0.012	0.017	0.020
Pitccull	0.096	0.081	0.268	0.524	0.155	0.080	0.018	0.011	0.060	0.060	0.039	0.010
Huampar	0.318	0.438	0.266	0.251	0.234	0.065	0.019	0.011	0.085	0.085	0.061	0.495
Huachua	0.250	0.348	0.813	0.115	0.000	0.000	0.261	0.371	0.000	0.000	0.025	0.000
Chliche	0.199	0.195	0.227	0.109	0.083	0.037	0.023	0.037	0.036	0.090	0.212	0.070
Pucro	0.026	0.037	0.074	0.019	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Misha	0.115	0.100	0.107	0.188	0.078	0.032	0.009	0.012	0.012	0.039	0.063	0.091
Canchis	0.517	0.078	0.066	0.000	0.000	0.294	0.179	0.549	0.084	0.089	0.013	0.214
Huallunca	0.484	0.211	0.133	0.096	0.089	0.062	0.038	0.012	0.111	0.054	0.014	0.144
Pirhua	0.059	0.027	0.046	0.031	0.023	0.003	0.002	0.004	0.034	0.026	0.019	0.033
Manca	0.279	0.235	0.219	0.196	0.179	0.122	0.062	0.013	0.000	0.000	0.000	0.017
Antacoto	4.664	5.115	7.190	3.788	2.831	0.542	0.338	0.288	0.962	1.190	1.547	1.554
Marcacocha	0.820	0.961	0.688	0.322	0.030	0.053	0.019	0.043	0.026	0.146	0.075	0.407
Marcapomacocha	6.773	7.702	8.402	5.576	3.228	1.142	0.995	1.579	2.280	2.723	2.157	2.608
Saangrar	0.327	0.565	0.670	0.332	0.229	0.069	0.038	0.041	0.218	0.186	0.234	0.117
Tucto	0.442	0.049	0.724	0.279	0.091	0.012	0.033	0.220	0.169	0.046	0.396	0.502
Yuracmayo	4.660	4.876	5.453	1.741	0.431	1.004	0.687	0.582	0.685	1.371	0.573	2.651
Tamboraque	23.115	28.003	33.915	18.720	15.040	12.055	9.684	8.450	7.509	10.661	7.997	14.284
Qno_embalsado	16.282	21.865	19.458	9.682	8.821	4.671	4.485	2.996	3.259	5.963	4.903	9.754
Marca_III	4.369	4.222	3.444	3.347	0.500	0.731	0.265	0.432	0.288	0.965	0.131	1.361

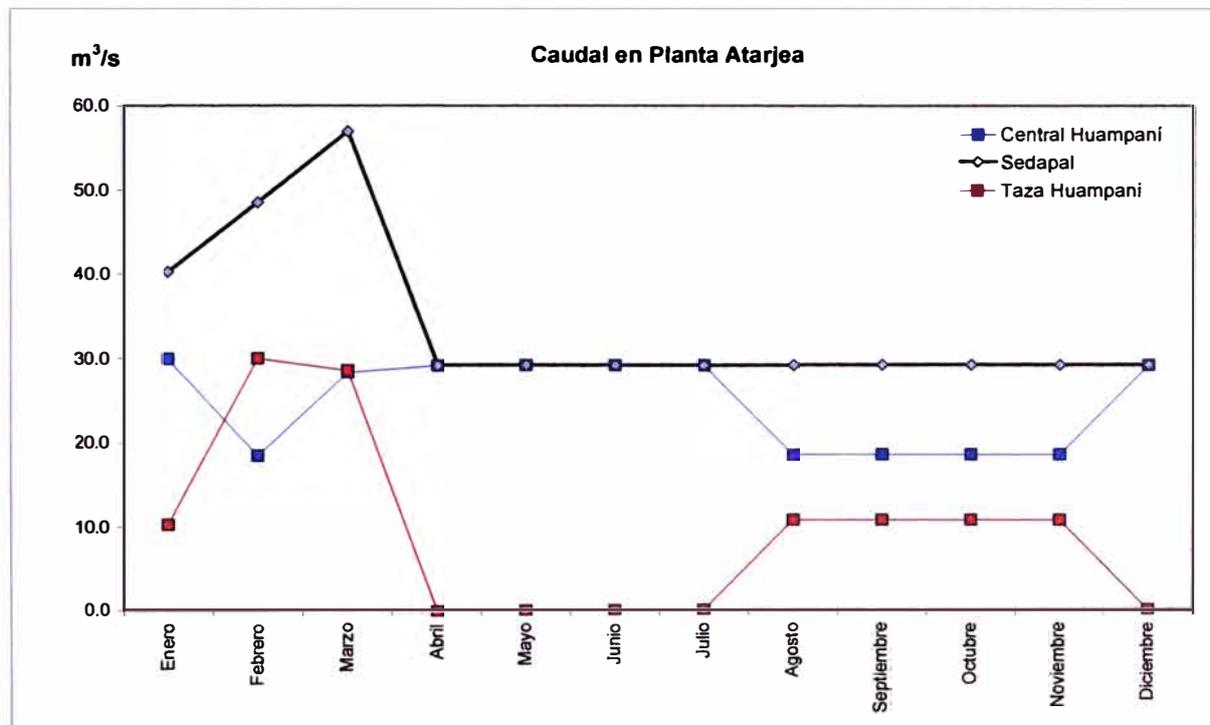


Figura N° 6.4. Caudal en planta Atarjea

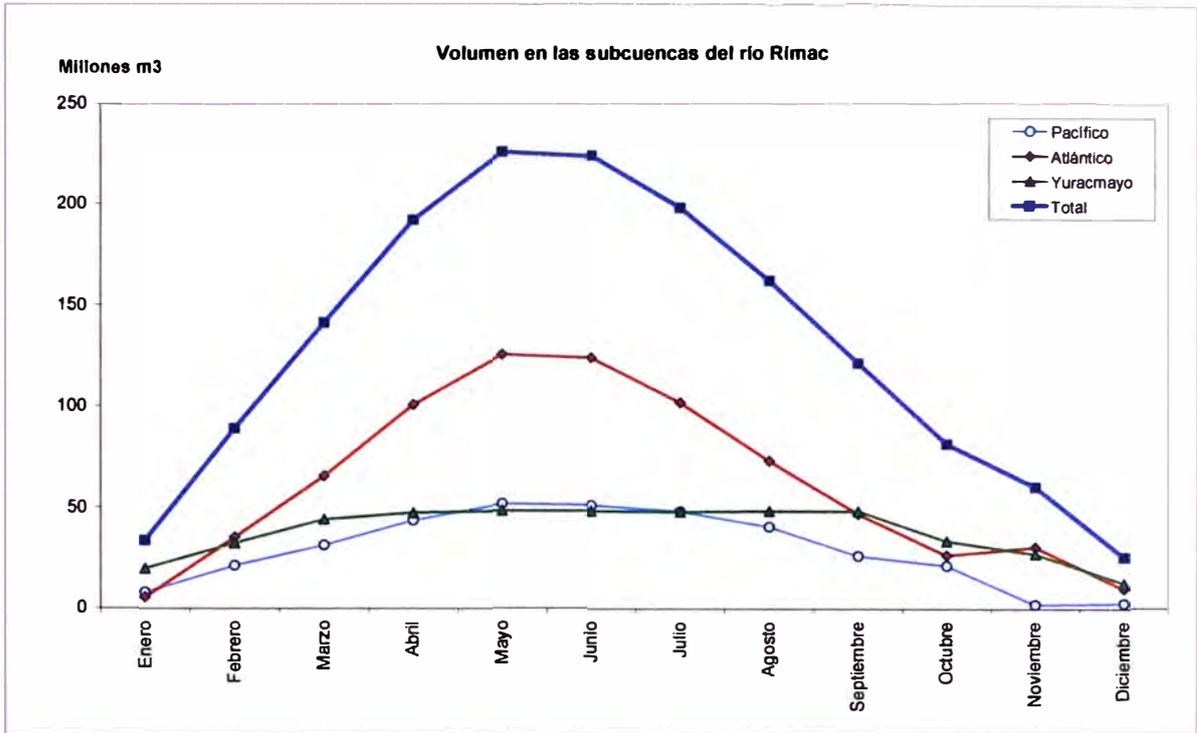


Figura Nº 6.5. Volumen embalsado en las subcuencas del río Rímac

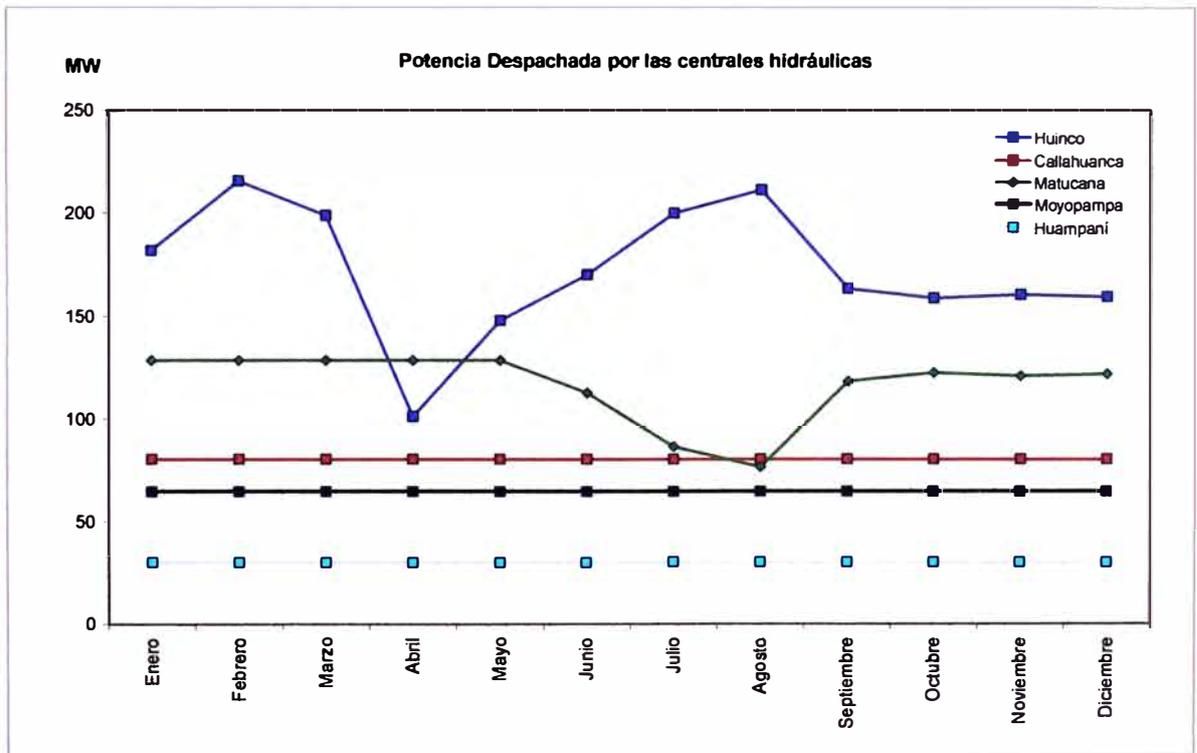


Figura Nº 6.6. Potencia despachada en centrales hidráulicas

6.2.2. Análisis con año hidrológico seco.

En base a la Tabla N° 5.1 se toma como año hidrológico seco el año 1990. Las condiciones iniciales de las lagunas se muestran en la Tabla N° 6.10.

Tabla N° 6.10. Volumen inicial de lagunas y embalses (Millones m³)

1990	Volumen Inicial Millones m ³	Volumen Máximo Millones m ³	% Embalse
QUISHA	8.700	8.70	100%
CARPA	2.720	17.80	15%
HUASCA	1.420	6.30	23%
SACSA	0.000	16.20	0%
QUIULA	0.000	1.90	0%
PITICULI	3.220	6.50	50%
HUAMPAR	1.280	3.30	39%
HUACHUA	0.850	5.10	17%
PIRHUA	0.000	0.90	0%
MANCA	0.000	1.60	0%
CHICHE	1.144	2.30	50%
CANCHIS	0.000	2.10	0%
HUALLUNCA	0.138	1.60	9%
MISHA	0.000	0.70	0%
PUCRO	0.000	2.00	0%
ANTACOTO	7.846	120.00	7%
MARCACOCHA	3.860	10.70	36%
MARCAPOMACOCHA	1.560	14.80	11%
SANGRAR	5.025	8.80	57%
TUCTO	1.035	2.75	38%
YURACMAYO	15.520	48.30	32%
TOTAL	54.318	282.35	19%

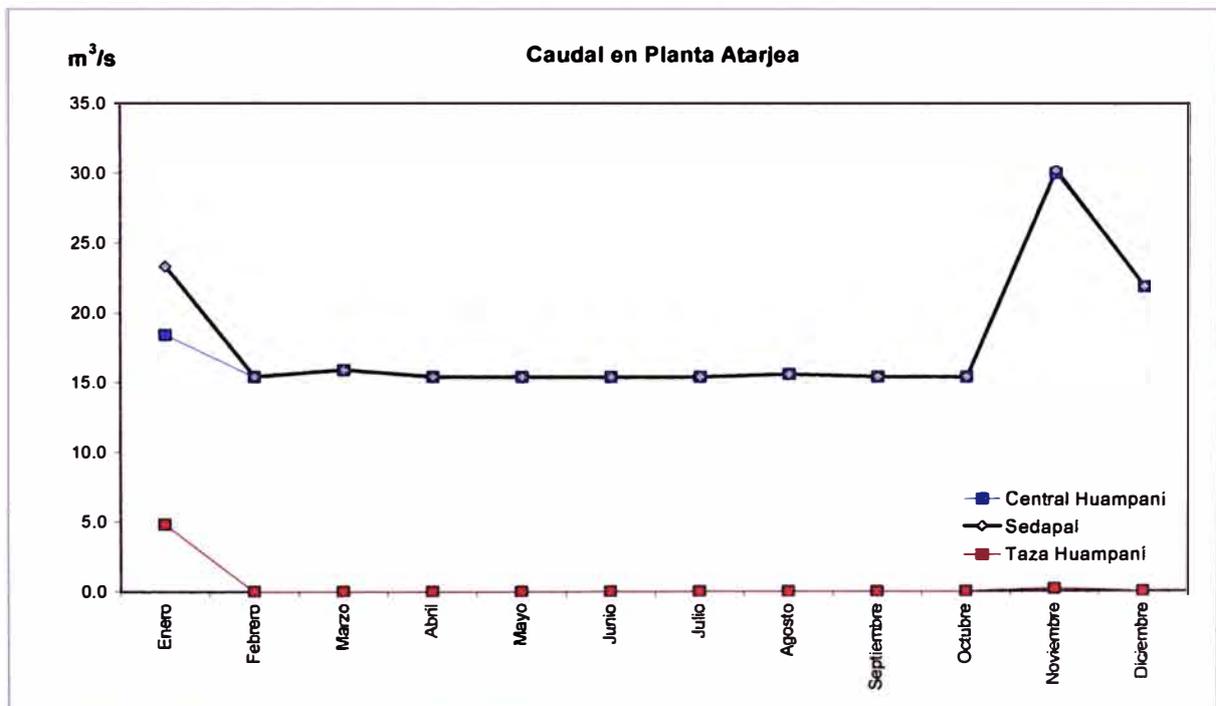


Figura N° 6.7. Caudal en la planta Atarjea.

Se mantienen las mismas condiciones y consideraciones que el problema base (hidrología promedio) como los límites de conducción en canales, potencia efectiva, rendimiento y la condición de volumen final igual al volumen inicial en los embalses, excepto la demanda de agua de la planta Atarjea.

Tabla N° 6.11. Afluentes de lagunas y embalses - Hidrología 1990 (m³/s)

Laguna	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Quisha	0.123	0.126	0.157	0.091	0.077	0.105	0.056	0.045	0.069	0.096	0.244	0.467
Carpa	0.168	0.172	0.216	0.125	0.068	0.092	0.049	0.040	0.061	0.084	0.214	0.172
Huasca	0.366	0.163	0.149	1.366	0.171	0.233	0.123	0.100	0.153	0.213	0.542	0.120
Sacsa	1.038	0.616	0.280	0.448	0.239	0.325	0.173	0.140	0.214	0.298	0.758	0.635
Qulula	0.056	0.029	0.045	0.024	0.014	0.020	0.010	0.008	0.013	0.018	0.045	0.026
Pitucull	0.075	0.112	0.061	0.042	0.030	0.041	0.022	0.018	0.027	0.038	0.096	0.093
Huampar	0.146	0.196	0.167	0.144	0.064	0.088	0.046	0.038	0.058	0.080	0.204	0.162
Huachua	0.069	0.060	0.109	0.088	0.035	0.047	0.025	0.020	0.031	0.043	0.109	0.108
Chliche	0.061	0.031	0.034	0.013	0.015	0.021	0.011	0.009	0.014	0.019	0.048	0.052
Puoro	0.014	0.032	0.030	0.003	0.008	0.011	0.006	0.005	0.007	0.010	0.025	0.022
Misha	0.092	0.034	0.044	0.009	0.018	0.025	0.013	0.011	0.016	0.023	0.058	0.051
Canchis	0.237	0.114	0.088	0.091	0.058	0.078	0.042	0.034	0.052	0.072	0.183	0.194
Huallunca	0.183	0.081	0.095	0.066	0.051	0.070	0.037	0.030	0.046	0.064	0.163	0.217
Pirhua	0.049	0.020	0.014	0.029	0.012	0.016	0.009	0.007	0.011	0.015	0.038	0.037
Manca	0.085	0.046	0.023	0.046	0.023	0.031	0.017	0.013	0.021	0.029	0.073	0.087
Antacoto	1.085	0.599	1.396	0.524	0.229	0.152	0.375	0.306	0.134	0.418	2.384	1.321
Marcacocha	0.388	0.062	0.224	0.058	0.028	0.019	0.047	0.038	0.017	0.101	0.220	0.164
Marcapomacocha	2.448	0.804	2.001	0.717	0.308	0.614	0.777	0.493	0.180	1.049	3.483	2.247
Sangrar	0.304	0.081	0.155	0.069	0.046	0.030	0.075	0.061	0.027	0.084	0.341	0.168
Tucto	0.160	0.057	0.104	0.046	0.032	0.030	0.036	0.034	0.029	0.048	0.084	0.080
Yuracmayo	2.598	1.656	1.390	1.074	0.830	0.613	0.390	0.306	0.310	0.782	1.654	1.972
Tamboraque	15.023	10.934	9.780	8.407	7.350	6.407	5.440	5.074	5.090	7.139	10.926	12.308
Qno_embalsado	9.639	5.431	5.909	4.114	1.778	4.357	1.540	1.707	2.216	3.165	9.880	8.533
Marca_III	1.315	1.684	2.143	1.153	0.705	1.040	0.686	0.154	0.115	0.903	5.892	3.780

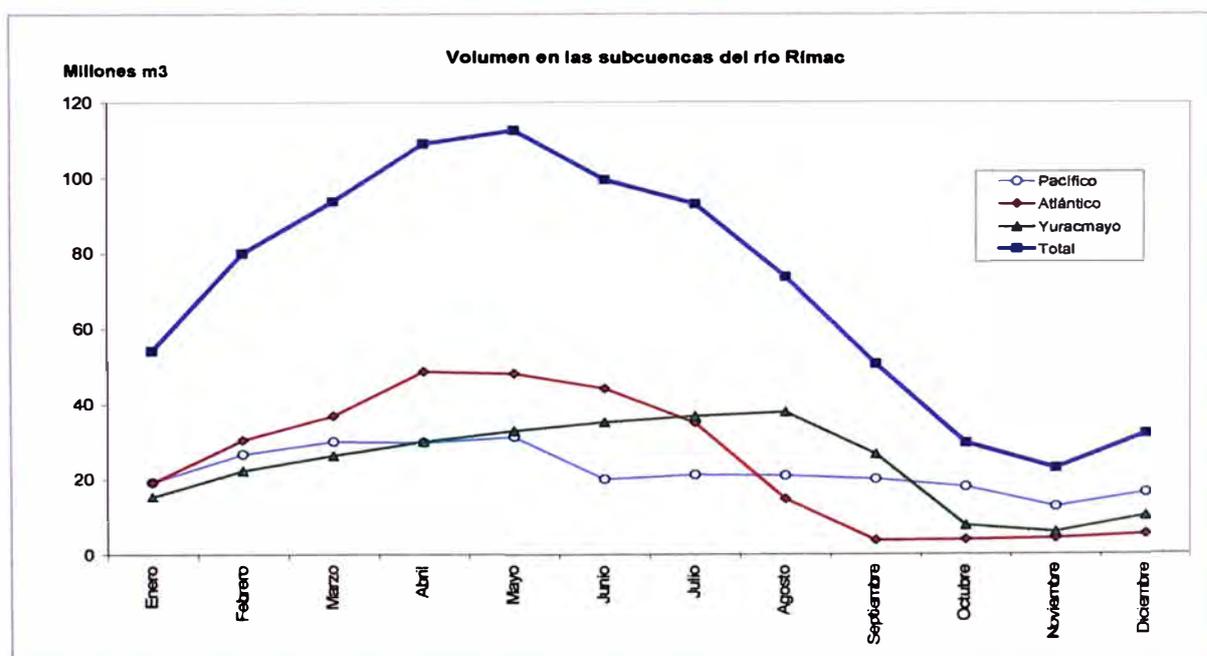


Figura N° 6.8. Volumen embalsado en las subcuencas del río Rímac

Se tomó la data histórica del año 1990 en base al informe de naturalización de caudales del río Rímac emitida al COES por la empresa Edegel.

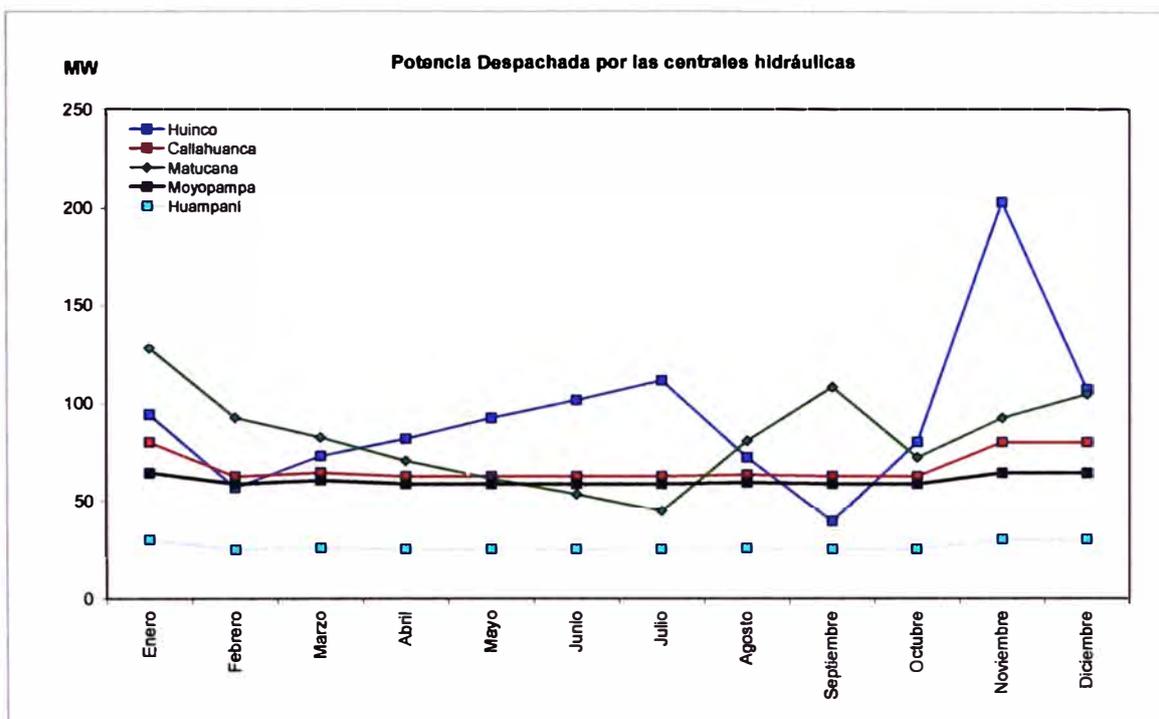


Figura N° 6.9. Potencia despachada en centrales hidráulicas.

Como puede observarse el nivel de caudal en época de estiaje disminuye considerablemente hasta noviembre que es cuando aparece de forma notable las lluvias en los embalses.

CONCLUSIONES

- El programa de descarga de lagunas elaborado es una herramienta flexible y práctica para el análisis en el manejo de los recursos hidráulicos en una cuenca, donde se encuentran presentes diferentes agentes, principalmente las centrales eléctricas de regulación y demandantes de agua para el servicio de agua potable.
- Podemos observar de los resultados mostrados anteriormente, que el manejo de los embalses en sus descargas se puede realizar de forma tal que no exista reboses y de esta forma usar de manera eficiente los recursos del agua.
- El nivel de caudal requerido por Sedapal o la planta Atarjea depende principalmente del volumen embalsado y de la hidrología que se presente en la cuenca del río Rímac. Por esta razón es que se recomienda la constante comunicación entre los principales agentes de la cuenca y de esta manera lograr el manejo eficiente de los recursos.
- Se logra observar de manera importante, que es posible aumentar el aprovechamiento del recurso hídrico, ampliando la infraestructura hidráulica por el margen derecho del río Rímac y de esta forma logramos aumentar la generación con el excedente y aumentar el volumen embalsado para periodos futuros, disminuyendo los riesgos de racionamiento tanto eléctrico como de agua potable.
- El análisis de descarga de lagunas puede ser más robusto aún, colocando restricciones a los demandantes de agua, como por ejemplo modelando la demanda de los regantes en función a su uso real y eficiente; otro forma de hacer más complejo el problema es colocando pérdidas por conducción en los canales y trayectorias o estableciendo un nivel de volumen objetivo a fines del periodo de estiaje.
- El modelo se puede hacer más complejo pero no se garantiza resultados satisfactorios ya que el problema de optimización y de programación lineal puede no converger, esto ocurre cuando se quiere optimizar los beneficios de todos los agentes, esto sería casi imposible ya que la optimización de un agente puede ser desfavorable para uno o varios agentes, además no se tendría una medida en común para el valor objetivo.
- En el presente informe se planteó optimizar el recurso hídrico, optimizando la generación hidroeléctrica y manejando de forma eficiente los embalses y lagunas. Con esto se pretendió de optimizar el beneficio de dos servicios públicos importantes como el servicio de agua potable y de electricidad, respetando los acuerdos con los demandantes de agua a lo largo del río Rímac.

ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones Técnicas de Embalses y Lagunas

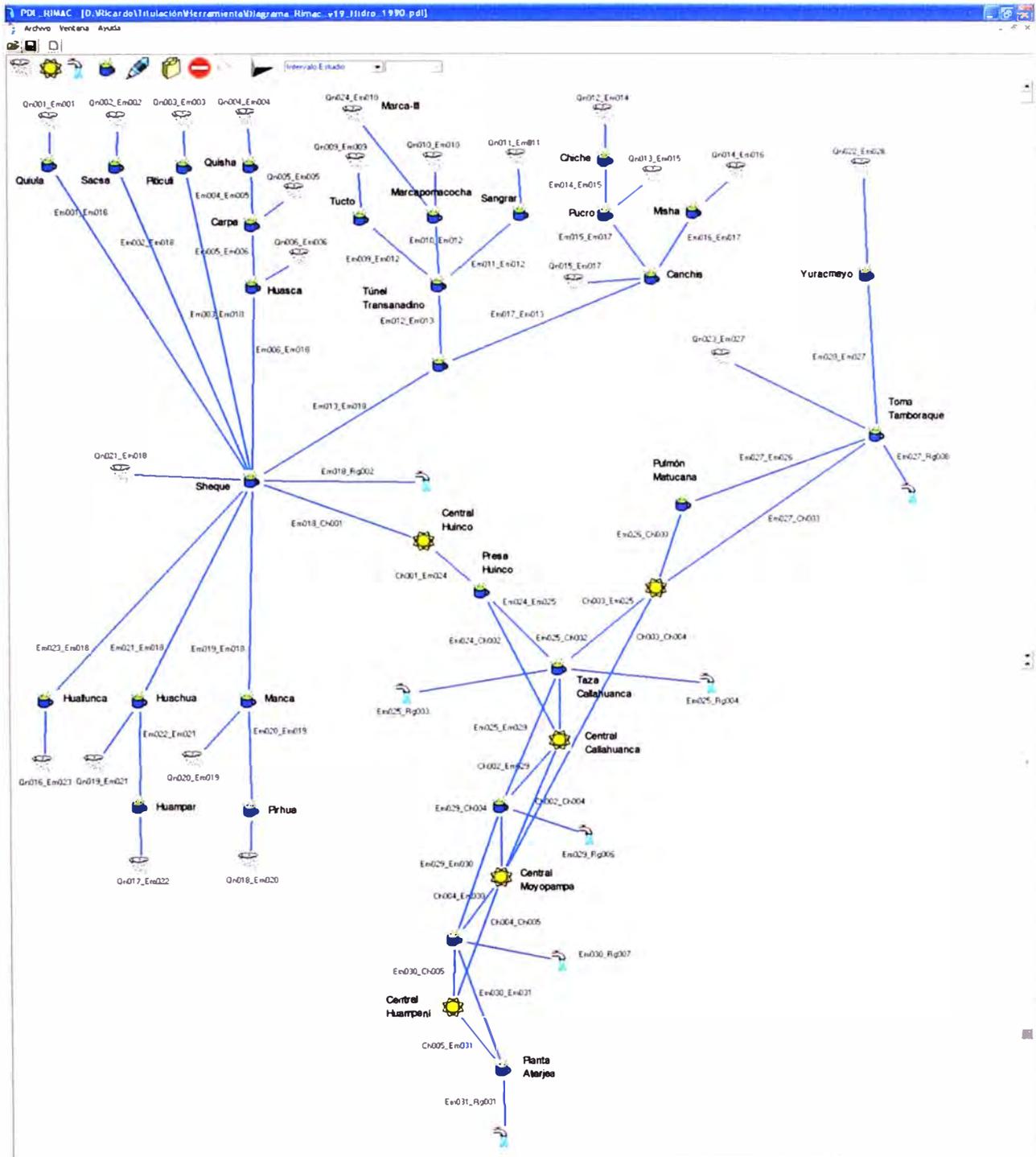
	LAGUNA	QUISHA	CARPA	HUASCA	SACSA	QUIULA	PITICULI	HUAMPAR	HUACHUA	PIRHUA	MANCA	
Ubicación	Distrito	Huanza	Huanza	Huanza	Huanza	Laraos	Huanza	Carampoma	Carampoma	Carampoma	Carampoma	
	Provincia	Huachochiri										
	Departamento	Lima										
	Altitud (msnm)	4850	4544	4381	4430	4534	4878	4828	4570	4785	4550	
	Represada el año	1875	1875	1875	1875	1940	1825	1924	1975	1878	1875	
Embalse	Area de cuenca (km ²)	7.8	18.5	27.2	32.5	5.2	7.1	8.9	18.8	2.3	7.1	
	Volumen (Millones m ³)	Máximo	9.18	21.2	6.55	18.08	1.92	7.1	3.77	5.72	0.95	1.78
		Muerto	0.48	3.4	0.25	1.86	0.02	0.8	0.47	0.82	0.05	0.18
		Neto	8.70	17.8	6.30	16.2	1.9	6.5	3.30	5.10	0.90	1.60
Altura Hidrostática (m)	18.6	18.4	9.3	13.5	5.8	9.9	9.8	13.9	9	14.8		
Represa	Altura de muro (m)	17	16.7	11	4.5	6	10.5	10.9	13.9	9.5	15.5	
	Ancho de base (m)	7	4	5	8	8	5	10	10.5	6		
	Ancho de corona (m)	1.5	1.5	1.65	1.8	1	1.7	2.5	1.5	1	1.5	
	Largo de presa (m)	51	68	63	60	70	177	125	130	72	108	
	Nº de vertederos	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	
Dispositivo Regulador	Nº de compuertas	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	
	Ancho compuerta (m)	0.7	0.7	0.9	0.87	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.91	
	Tipo	Manual de volante y cremallera										

	LAGUNA	CHICHE	CANCHIS	HUALLUNCA	MISHA	PUCRO	ANTACOTO	MARCACOCHA	MARCAPOMACOCHA	SANGRAR	TUCTO	YURACMAYO	
Ubicación	Distrito	Carampoma	Carampoma	Carampoma	Carampoma	Carampoma	Marcapomacocha	Marcapomacocha	Marcapomacocha	Marcapomacocha	Marcapomacocha	San Mateo	
	Provincia	Huachochiri	Huachochiri	Huachochiri	Huachochiri	Huachochiri	Yauli	Yauli	Yauli	Yauli	Yauli	Huachochiri	
	Departamento	Lima	Lima	Lima	Lima	Lima	Junin	Junin	Junin	Junin	Junin	Lima	
	Altitud (msnm)	4530	4421	4510	4670	4470	4445	4512	4388	4481	4620	4315	
	Represada el año	1930	1925	1940	1875	1875	1999	1969	1958	1960	1988	1995	
Embalse	Area de cuenca (km ²)	7.9	26.5	8.3	3.1	9.4	107	13	143	22	6	89	
	Volumen (Millones m ³)	Máximo	2.68	2.26	1.60	0.72	2.12	120	12.7	15.5	10.8	2.75	53.3
		Muerto	0.38	0.16	0.00	0.02	0.12	0	2	0.7	2	0	5
		Neto	2.30	2.10	1.60	0.70	2.00	120	10.7	14.8	8.8	2.75	48.3
Altura Hidrostática (m)	9.5	10.3	12.05	5.2	10.3	14	3.8	4	23.5	6.15	36.5		
Represa	Altura de muro (m)	10	10.8	13.8	5.5	10.8	16.5	6.5	8	24.5	7	58	
	Ancho de base (m)	8	6	44	5	6	14.3	5	7	20	3	30	
	Ancho de corona (m)	1.7	2	4	2	1.5	5.9	0.8	4.5	2.8	1	8	
	Largo de presa (m)	61.5	69	120	12	13	99.2	31	41	93	33	558.5	
	Nº de vertederos	1	2	1	1	1	1	2	4	3	2	1	
Dispositivo Regulador	Nº de compuertas	1	1	1	1	1	1	3	2	2	1	1	
	Ancho compuerta (m)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.74	1.42	0.95	1	0.8	
	Tipo	Manual de volante y cremallera	Eléctrico, servomotor										

Anexo 2: Propiedades de Canales y Trayectorias

PROPIEDADES DE ESQUEMA							
AFLUENTES | CENTRALES | REGANTES | EMBALSES | CANALES							
Nº_Canal	Codigo	Qo_Max	Qo_Min	Tiempo	% Pérdida	Nombre	Estado
1	Qn001_Em001	100	0	0	0.00	precipitacion_quiula	Activado
2	Qn002_Em002	100	0	0	0.00	precipitacion_sacsa	Activado
3	Qn003_Em003	100	0	0	0.00	precipitacion_pitculi	Activado
4	Qn004_Em004	100	0	0	0.00	precipitacion_quisha	Activado
5	Em004_Em005	5.73	0.00	0	0.00	carpa_carpa	Activado
6	Em005_Em006	5.68	0.00	0	0.00	carpa_huasca	Activado
7	Qn005_Em005	100	0.00	0	0.00	precipitacion_carpa	Activado
8	Qn006_Em006	100	0.00	0	0.00	precipitacion_huasca	Activado
9	Em001_Em018	3.44	0.00	0	0.00	quiula_sheque	Activado
10	Em002_Em018	5.32	0.00	0	0.00	sacsa_sheque	Activado
11	Em003_Em018	5.78	0.00	0	0.00	pitculi_sheque	Activado
12	Em006_Em018	5.58	0.00	0	0.00	huasca_sheque	Activado
15	Qn009_Em009	100	0.00	0	0.00	precipitacion_tucto	Activado
16	Qn011_Em011	100	0.00	0	0.00	precipitacion_sangrar	Activado
17	Qn010_Em010	100	0.00	0	0.00	precipitacion_marcapo	Activado
20	Em009_Em012	3.00	0.00	0	0.00	tucto_tunel	Activado
21	Em011_Em012	9.35	0.00	0	0.00	sangrar_tunel	Activado
22	Em010_Em012	10.5	0.00	0	0.00	marcapoma_tunel	Activado
23	Em012_Em013	1.45	0.00	0	0.00	tunel_transandino	Activado
24	Qn012_Em014	100	0.00	0	0.00	precipitacion_chiche	Activado
25	Em014_Em015	5.64	0.00	0	0.00	chiche_pucro	Activado
26	Qn013_Em015	100	0.00	0	0.00	precipitacion_pucro	Activado
27	Qn014_Em016	100	0.00	0	0.00	precipitacion_misha	Activado
28	Em015_Em017	5.86	0.00	0	0.00	pucro_canchis	Activado
29	Em016_Em017	4.17	0.00	0	0.00	misha_canchis	Activado
30	Qn015_Em017	100	0.00	0	0.00	precipitacion_canchis	Activado
31	Em017_Em013	5.84	0.00	0	0.00	canchis_tunel	Activado
32	Em013_Em018	21.00	0.00	0	0.00	milloc_sheque	Activado
33	Qn017_Em022	100	0.00	0	0.00	precipitacion_huampar	Activado
34	Qn018_Em020	100	0.00	0	0.00	precipitacion_pirhua	Activado
35	Qn016_Em023	100	0.00	0	0.00	precipitacion_huallunca	Activado
36	Qn019_Em021	100	0.00	0	0.00	precipitacion_huachua	Activado
37	Qn020_Em019	100	0.00	0	0.00	precipitacion_manca	Activado
38	Em022_Em021	5.80	0.00	0	0.00	huampar_huachua	Activado
39	Em020_Em019	5.50	0.00	0	0.00	pirhua_manca	Activado
40	Em023_Em018	6.44	0.00	0	0.00	huallunca_sheque	Activado
41	Em021_Em018	6.92	0.00	0	0.00	huachua_sheque	Activado
42	Em019_Em018	7.06	0.00	0	0.00	manca_sheque	Activado
43	Qn021_Em018	100	0.00	0	0.00	precipitacion_sheque	Activado
44	Em018_Ch001	25.0	0.00	0	0.00	sheque_huinco	Activado
45	Ch001_Em024	25.0	0.00	0	0.00	huinco_presa	Activado
46	Em024_Em025	10.5	0.00	0	0.00	presa_taza-calla	Activado
47	Em025_Ch002	20.5	0	0	0.00	taza-calla_callehuanca	Activado
48	Ch003_Em025	12.5	0.00	0	0.00	matucana_taza-calla	Activado
49	Em026_Ch003	1.48	0	0	0.00	pulmon_matucana	Activado
50	Em027_Em026	1.48	0.00	0	0.00	tomboraque_pulmon	Activado
51	Qn022_Em028	100	0.00	0	0.00	precipitacion_yuracmoyo	Activado
52	Em028_Em027	9.15	0.00	0	0.00	yuracmoyo_tomboraque	Activado
53	Ch002_Em029	17.5	0.00	0	0.00	callehuanca_taza-moyo	Activado
54	Em029_Ch004	17.5	0	0	0.00	taza-moyo_moyopampa	Activado
55	Ch004_Em030	18.5	0.00	0	0.00	moyopampa_taza-huamp	Activado
56	Em030_Ch005	18.5	0	0	0.00	taza-huamp_huampani	Activado
57	Ch005_Em031	30	0.00	0	0.00	huampani_planta	Activado
58	Em031_Fg001	100	0.00	0	0.00	planta_Sedapal	Activado
59	Em018_Fg002	0.0823	0.00	0	0.00	sheque_reg2	Activado
60	Em025_Fg003	0.2506	0.00	0	0.00	taza-calla_reg3	Activado
61	Em025_Fg004	0.1556	0.00	0	0.00	taza-calla_reg4	Activado
63	Em029_Fg006	0.0934	0.00	0	0.00	taza-moyo_reg6	Activado
64	Em030_Fg007	0.4687	0.00	0	0.00	taza-huamp_reg7	Activado
65	Qn023_Em027	100	0.00	0	0.00	precipitacion_tomboraque	Activado
66	Qn024_Em010	100	0.00	0	0.00	aporte_marca_III	Activado
74	Em027_Fg008	0.2438	0.00	0	0.00	canal_regente	Activado
78	Ch002_Ch004	100	0.00	0	0.00	aporte_Callehuanca	Activado
79	Ch004_Ch005	100	0.00	0	0.00	aporte_Moyopampa	Activado
80	Ch003_Ch004	100	0.00	0	0.00	aporte_rio_Rimac	Activado
81	Em024_Ch002	100	0.00	0	0.00	rebose_presa_Hu	Activado
82	Em029_Em030	100	0.00	0	0.00	rebose_taza_Moy	Activado
83	Em030_Em031	100	0.00	0	0.00	rebose_taza-Huamp	Activado
84	Em025_Em029	100	0.00	0	0.00	rebose_taza_Calla	Activado
85	Em027_Ch003	100	0.00	0	0.00	aporte_rio_Rimac	Activado

Anexo 3: Configuración Hidrológica del Sistema de Lagunas y Cuencas del río Rímac



Anexo 4: Dotación de agua para regantes ubicados a lo largo del río Rímac

SECTOR	DENOMINACIÓN	UBICACIÓN	COMUNIDADES QUE SE BENEFICIAN CON LA DOTACIÓN DE AGUA DE LAS DIFERENTES TOMAS Y CANALES	DOTACIÓN (litros/seg)	OBSERVACIONES
Sheque - Ventana 6	Ventana 1	Pachua			
	Ventana 2	San Juan			
	Ventana 3	Pomacocha			
	Ventana 4	Cunya	Comunidad Huachupampa	8.40	
	Ventana 5	Huachupampa	Comunidad Huachupampa	48.70	
	Ventana 6	Ayubambca	Comunidad Castilla	18.20	
Sub Total de pérdidas:				62.30	
Hulneo Callahuana		Pueblo Hunco	Pueblo Hunco	9.30	
		Cana Hunco	Comunidad de Hulneo	14.20	
		San Antonio	Comunidad de Castilla	10.50	
	Ventana 1	Cunco	Comunidad de Castilla	10.50	
	Ventana 2	Tamberay	Comunidad de Castilla	10.70	
	Ventana 3	Koreman	Comunidad de Castilla	10.40	
	Ventana 4	Spo Domingo	Comunidad de Callahuana (Craucal)	18.70	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL
	Ventana 5	Callahuana	Comunidad de Callahuana (Sta Rosa)	41.90	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL
	Taza	Comunidad de Callahuana	75.30	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL	
Sub Total de pérdidas:				250.60	
Tamboraque - Matucana	Ventana 1	Ocatara	Pachua	10.50	
	Ventana 2	Oñures (Inocencia)	Comunidad de Matucana	6.50	
	Ventana 3	Pachua	Pueblo Pachua	18.50	
	Ventana 4	Pachuyaco	Comunidad de Pachuyaco	15.50	
	Ventana 5	Ayas	Comunidad de Ayas	150.00	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL
	Ventana 6	Lincay	Comunidad de Lincay	50.50	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL
Sub Total de pérdidas:				243.00	
Surco - Callahuana	Ventana 3	Pte Ventanas	Comunidad Santiago de Surco	16.50	
	Ventana 5	Repardón	Comunidad San Mateo de Otaz	53.00	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL
	Ventana 2	Lurancayo	Pueblo Lurancayo - Comunidad San Mateo de Otaz	20.50	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL
	Ventana 7	Piedra Raada	Pueblo Tuere - Comunidad Callahuana	27.50	
Sub Total de pérdidas:				115.50	
Barbablanca - Moyopampa	Ventana 1	Luzumaseca	Pueblo Luzumaseca - Distrito de Santa Eulalia	10.50	
	Ventana 2	Santa Rosa	Distrito de Santa Eulalia	10.50	
	Ventana 4	Petalosa	Comunidad de Petalosa	10.10	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL
	Ventana 5	Taza S. Aires	Regadío de Arcobles - Carretera de acceso a La Taza	6.30	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL
		Taza Libertad	Comunidad Pueblo Joven Libertad	10.70	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL
	Taza Pedregal	Comunidad Pueblo Joven San Antonio y Nicolás de Pirola	50.10	Oficio N° 158-97-AG-AD-LC-A-DIC-ORL	
Sub Total de pérdidas:				99.40	
Galería - Canal Huampani	Cana Hm 1.42	La Ribera	Pasaje Los Estancieros, Reg. de Areas Verdes		
	Cana Hm 1.43	La Ribera	Pasaje Hércules, Reg. de Areas Verdes		
	Cana Hm 1.72	La Ribera			
	Cana Hm 1.73	La Ribera			
	Cana Hm 1.62				
	Cana Hm 1.92				
	Cana Hm 2.02				
	Cana Hm 2.22				
	Cana Hm 2.4	N. de Pirola	Pasaje Solaz, Reg. de Areas Verdes	3.30	
	Cana Hm 2.44	N. de Pirola		3.20	
	Cana Hm 2.52				
	Cana Hm 2.72	Mare Krishna	Colegio y Viviendas de Mare Krishna y pasaje	6.50	
	Cana Hm 2.82	Santa Isabel	Reg. de Areas Verdes	4.20	
	Cana Hm 2.83	Santa Isabel		14.80	
	Cana Hm 2.82	ESMON	Reg. de Areas Verdes	51.20	
	Cana Hm 2.92	ESMON	Reg. de Areas Verdes	6.10	
	Cana Hm 3.22	Santa Maria	Reservorio de Agua de la FAP		
	Cana Hm 3.23	Santa Maria	Reg. de Areas Verdes en Vivencia, P. Las Lajas N°141	6.30	
	Cana Hm 3.32	Santa Maria	Reg. de Areas Verdes en Vivencia, Los Jacinthes N°225	6.30	
	Cana Hm 3.34	Santa Maria			
	Cana Hm 3.52	Santa Maria	Reg. de chacras y reservorio de agua		
	Cana Hm 3.62	Santa Maria			
	Cana Hm 3.72	Santa Maria	Lienas Tancos para M. A. B. C. D. F. G. de Pueblo Joven Bernardino Salguero		
	Cana Hm 3.73	Santa Maria			
	Cana Hm 3.72	Santa Maria			
	Cana Hm 3.82	Santa Maria	Reg. de Areas Verdes en Vivencia, Los Girasoles N°135		
	Cana Hm 3.83	Santa Maria			
Cana Hm 3.82	Santa Maria	Reg. de chacras en P. de Santa Maria			
Cana Hm 4.0	Santa Maria	Reg. de Areas Verdes en Vivencia Los Aires N°142	21.20		
Cana Hm 4.21	Yanacoto	Reg. de Areas Verdes en Ministerio de Agricultura			
Cana Hm 4.82	Yanacoto Ato	P. Yanacoto Ato	5.00		
Ventana 1	Yanacoto	Reg. de Areas Verdes en Ademe, El Bosque y Colegio Beata Ineida	113.40		
Ventana 2	Chacrasana	Pueblo Joven Chacrasana	9.20		
Taza	Huampani	Asentamiento Humano Huampani Ato	3.50		
Sub Total de pérdidas:				468.70	
TOTAL DE PERDIDAS DE AGUA				1300.60	

1) (2) -

1) La mayoría de las dotaciones son acuerdos entre Electrolima (hey EDEGE) y la comunidad de mismo nombre, producto de las obras realizadas durante la etapa de construcción de los líneas

BIBLIOGRAFÍA

1. COES-SINAC, Estadística de Operaciones, 2007.
2. INEI, Estadística de producción de agua por tipo de fuente, 2008.
3. Eduardo Zegarra, Mercado y Reforma de la gestión del agua en el Perú.
4. Eduardo Zegarra, Mercado de Aguas: viabilidad y potencialidades de un instrumento para la reforma de la gestión hídrica en el Perú.
5. Hanak, California's Water Market, 2002.
6. Colby y Randall, Water right transactions: market value and price dispersion, 1993.
7. Miller, The rights to use versus the rights to sell: spillover effects and constraints on the water rights of irrigation organization members, 1987.
8. W. Easter, Water Allocation and Water Markets An Analysis of Gains from Trade in Chile, 1995.
9. Solanes y A. Dourojeanni, Mercados de derechos de agua. Debate agrario, 1995.
10. Absalón Vásquez Villanueva, Manejo de Cuencas Altoandinas.
11. J. Lund y J. Guzmán, Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel, 1999.
12. Eduardo Zegarra, La investigación social sobre el manejo del agua de riego en el Perú: una mirada a conceptos y estudios empíricos.
13. Axel Dourojeanni, Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica.
14. Metodología para la elaboración de Planes Maestros de Cuencas, Instituto de Promoción para la gestión del agua (IPROGA).
15. El Impacto Social de la Privatización y de la Regulación de los Servicios Públicos en el Perú, Grupo de Análisis para el Desarrollo (GRADE).
16. P. Restrepo, J. Salas y J. Campos, Evaluación de los recursos de agua disponibles en la Atarjea. Sedapal 2003.
17. Empresas & Negocios. Año 8, N° 363. Revista de la Cámara de Comercio, 2009.
18. Mario Tapia, Concepto sobre cuencas hidrográficas.
19. R. Gayoso, Estudio de Caudales Naturalizados por EDEGEL en el río Rímac, 2008
20. ILOG CPLEX 8.0, Manual de usuario, 2002.

21. M. Almiñana, Programación con CPLEX, Universitas Miguel Hernández, departamento de Estadística y Matemática Aplicada.
22. Antonio Conejo, Guillermo Pérez, Modelos para la explotación óptima de generación en un entorno competitivo. 1999.