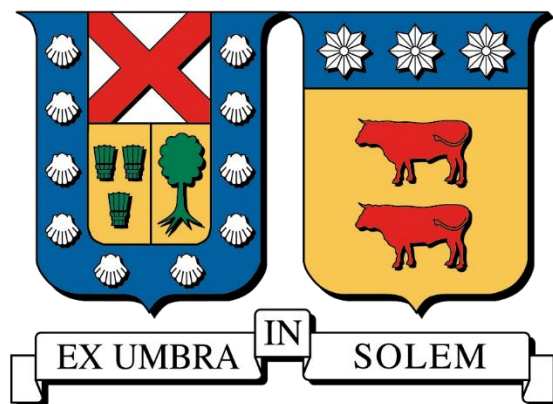


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS  
VALPARAÍSO – CHILE



**DISEÑO DE UNA RED DE GRIFOS DE ALTA PRESIÓN PARA  
COMBATIR INCENDIOS EN VALPARAÍSO**

**IGNACIO ESTEBAN VILLANUEVA SANTANA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : SR. PABLO ESCALONA R.  
PROFESOR CORREFERENTE : SR. JORGE WESTON F.

MAYO 2018

# Índice de Contenidos

<b>1</b>	<b>Problema de investigación</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>4</b>
2.1	Objetivo General .....	4
2.2	Objetivos Específicos .....	4
<b>3</b>	<b>Marco Teórico</b> .....	<b>5</b>
3.1	Situación actual .....	5
3.1.1	Vulnerabilidad de la ciudad .....	5
3.1.2	Actual Red de Grifos en Valparaíso .....	7
3.1.2.1	Elementos de la red .....	8
3.1.2.2	Normas .....	8
3.1.2.2.1	Localización de grifos contra incendio .....	9
3.1.2.2.2	Caudal de la matriz .....	9
3.1.2.3	Deficiencias .....	9
3.1.2.3.1	Problemas de localización .....	10
3.1.2.3.2	Problemas de presión .....	10
3.1.3	Proyectos de mejora realizados .....	11
3.1.4	Situación posterior a proyectos de mejora .....	13
3.2	Caso San Francisco .....	13
3.2.1	Historia .....	14
3.2.2	Sistema municipal de suministro de agua (MWSS) .....	15
3.2.3	Sistema auxiliar de suministro de agua (AWSS) .....	16
3.2.3.1	Área protegida por el AWSS .....	16
3.2.3.2	Principales características del AWSS .....	17
3.2.3.2.1	Presión del sistema .....	19
3.2.3.2.2	Disposición de grifos .....	19
3.2.3.3	Equipo de apoyo .....	20
3.2.4	Proyectos de mejora y trabajos futuros .....	21
3.3	Modelos matemáticos de localización .....	24
3.3.1	Location Set Covering Problem (LSCP), Toregas .....	25

3.3.2	Maximal Covering Location Problem (MCLP), Church & Revelle .....	27
3.3.3	MCLP con cobertura obligatoria .....	29
<b>4</b>	<b>Formulación del modelo .....</b>	<b>33</b>
4.1	Problema 1 .....	33
4.1.1	Descripción P1 .....	33
4.1.2	Modelo extendido P1 .....	34
4.1.3	Modelo compacto P1 .....	39
4.2	Problema 2 .....	39
4.2.1	Descripción P2.....	39
4.2.2	Modelo extendido P2.....	39
4.2.3	Modelo compacto P2 .....	41
<b>5</b>	<b>Estudio computacional.....</b>	<b>42</b>
5.1	Preprocesamiento.....	42
5.1.1	Conjuntos.....	43
5.1.2	Parámetros .....	47
5.2	Problema 1 .....	55
5.2.1	Partida en caliente, problema P0 .....	55
5.2.2	Resultados con restricción de cobertura mínima .....	56
5.2.3	Resultados sin restricción de cobertura mínima .....	58
5.2.4	Dinámica de los modelos.....	60
5.3	Problema 2 .....	63
<b>6</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>65</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>69</b>

---

## Índice de Tablas

<b>Tabla 3.1:</b> Distritos dentro del área protegida. Fuente: (Manson, Connick, & Ransom, 1908).....	17
<b>Tabla 5.1:</b> Perfiles de elevación y parámetro ajuste radio de cobertura. Fuente: Elaboración propia.....	50
<b>Tabla 5.2:</b> Área de las cuencas de Valparaíso. Fuente: Elaboración propia.....	51
<b>Tabla 5.3:</b> Criticidad de las cuencas de Valparaíso. Fuente: (Padilla, 2011). .....	51
<b>Tabla 5.4:</b> Fracción mínima obligatoria para las cuencas de Valparaíso. Fuente: Elaboración propia.....	52
<b>Tabla 5.5:</b> Matriz de pertenencia. Fuente: Elaboración propia. ....	53
<b>Tabla 5.6:</b> Resultados iteraciones Problema 1 con restricción 2 activada. Fuente: Elaboración propia.....	56
<b>Tabla 5.7:</b> Resultados iteraciones Problema 1 con restricción 2 desactivada. Fuente: Elaboración propia.....	59
<b>Tabla 5.8:</b> Resultados Problema 2. Fuente: Elaboración propia. ....	64

## Índice de Figuras

<b>Figura 3.1:</b> Cuencas de la ciudad de Valparaíso. Fuente: (Padilla, 2011).....	6
<b>Figura 3.2:</b> Ranking de vulnerabilidad Cuencas de Valparaíso. Fuente: (Padilla, 2011). ....	6
<b>Figura 3.3:</b> Mapa Vulnerabilidad Cuencas Valparaíso. Fuente: (Padilla, 2011).....	7
<b>Figura 3.4:</b> Proyecto mejora red de grifos. Fuente: (Gobierno de Chile, 2014).....	12
<b>Figura 3.5:</b> Esquema de presión AWSS. Fuente: (AECOM/AGS JV, 2014). ....	18
<b>Figura 3.6:</b> Actual AWSS. Fuente: (AECOM/AGS JV, 2014).....	22
<b>Figura 3.7:</b> Confiabilidad de suministro de agua actual del sistema. Fuente: (AECOM/AGS JV, 2014). ....	24
<b>Figura 5.1:</b> Replica de cuencas propuestas por Padilla (2011). Fuente: Elaboración propia. ....	43
<b>Figura 5.2:</b> Conjunto de cuencas. Fuente: Elaboración propia. ....	44
<b>Figura 5.3:</b> Conjunto de nodos potenciales. Fuente: Elaboración propia. ....	45
<b>Figura 5.4:</b> Malla cuadriculada para formación de manzanas. Fuente: Elaboración propia. ....	46
<b>Figura 5.5:</b> Conjunto de nodos demanda. Fuente: Elaboración propia. ....	47
<b>Figura 5.6:</b> Radio de cobertura S. Fuente: Elaboración propia. ....	49
<b>Figura 5.7:</b> Perfiles de elevación. Fuente: Elaboración propia. ....	50
<b>Figura 5.8:</b> Código Matlab para cálculo de parámetro $d_{ij}$ . Fuente: Elaboración propia.....	53
<b>Figura 5.9:</b> Fracción de área cubierta local y global para Problema 1 con Restricción 2 activada. Fuente: Elaboración propia. ....	57
<b>Figura 5.10:</b> Fracción de área cubierta local y global para Problema 1 con Restricción 2 desactivada. Fuente: Elaboración propia. ....	59
<b>Figura 5.11:</b> Grifos asignados para iteración $p = 1050$ con Restricción 2 activada. Fuente: Elaboración propia.....	61
<b>Figura 5.12:</b> Grifos asignados para iteración $p = 1050$ con Restricción 2 desactivada. Fuente: Elaboración propia.....	61
<b>Figura 5.13:</b> Grifos asignados para iteración $p = 1600$ con Restricción 2 activada. Fuente: Elaboración propia.....	62
<b>Figura 5.14:</b> Grifos asignados para iteración $p = 1600$ con Restricción 2 desactivada. Fuente: Elaboración propia.....	63
<b>Figura 5.15:</b> Grifos asignados para Problema 2. Fuente: Elaboración propia.....	64

# 1 Problema de investigación

La ciudad de Valparaíso se caracteriza por ser una zona de compleja topografía, con cerros y laderas que complican el acceso a ciertas zonas, con un clima de altas temperaturas en ciertas estaciones del año pero con un fuerte viento debido a la costa, y con una importante cantidad de vegetación combustible y basurales. Todo lo anterior convierte a la ciudad en una zona propicia no solo para la formación de incendios, sino que también para su rápida propagación y complicado control por parte del cuerpo de bomberos (Reconstrucción Valparaíso , 2014).

Lo previamente descrito da cuentas de la necesidad de contar con un sistema ante incendio que responda de manera eficiente ante las catástrofes que se puedan llegar a presentar, de modo de facilitar la tarea de todo aquel que se encargue de combatir los incendios, sin embargo la realidad es diferente. Enfocándose específicamente en la red de grifos diseñada para combatir incendios ubicada en la ciudad de Valparaíso, existe evidencia de que esta no responde de una manera adecuada para el cumplimiento de su propósito (Emol, 2015).

De lo expuesto surge la primera interrogante del estudio, la que se enfoca en identificar las principales debilidades de la actual red de grifos de la ciudad, y responder el por qué estos factores provocan que se señale que la red es ineficiente y requiera de una remodelación.

La primera evidencia surge de lo ocurrido durante el ‘Gran incendio de Valparaíso’ que tuvo lugar el año 2014. En dicha catástrofe las llamas cubrieron un total de 48 hectáreas, privaron de la vida a 15 personas y destruyeron 2910 casas y 92 centros comunitarios y

comerciales. El incendio, si bien fue provocado por posible negligencia, se expandió rápidamente producto de las altas temperaturas presentes, combinado de un viento cálido y los basurales y zonas vegetales existentes. Esto no pudo ser controlado rápidamente por el cuerpo de bomberos, en cierta forma, debido a la ausencia de grifos o accesos al agua en las altas zonas de la ciudad. (Chahuán, y otros, 2014).

No obstante, esto no es un hecho aislado, posterior a dicho evento y aun habiéndose tomado medidas correctivas y preventivas, las que se resumen en la instalación de 16 grifos de alta presión, 18 estanques de agua y reparaciones menores en las tuberías actuales, los incendios han continuado siendo sucesos difíciles de controlar incluso en las zonas más céntricas de la ciudad, donde los problemas de acceso disminuyen. Se advierte entonces que la red de grifos no solo presenta problemas de localización, sino también problemas de baja presión, donde ante catástrofes que ameritan el uso de varios grifos simultáneamente, la presión de agua desciende, debido a principalmente que esta se encuentra conectada a la red pública de abastecimiento de agua (SoyValparaíso, 2015).

En consecuencia surge la segunda interrogante, la cual se orienta a la búsqueda de soluciones, y cómo sería posible mejorar la red actual para que esta responda de manera eficiente a la labor para la cual fue diseñada.

Un caso similar al de Valparaíso, es el que presenta la ciudad de San Francisco. En primer lugar, dicha ciudad presenta muchas de las características topográficas, geográficas y climáticas de Valparaíso, no obstante, su realidad es completamente opuesta. San Francisco actualmente posee una red de grifos de alta presión independiente de la red pública de agua potable, compuesta por un total de 1550 grifos abastecida por 3 reservas de agua, sumando

un total de cuatro millones de litros de agua disponible. Adicionalmente, se han realizado una importante cantidad de proyectos de avance y mejora desde la construcción de la red original, todo con el propósito de poseer una red moderna y que responda de manera efectiva ante cualquier catástrofe (AECOM/AGS JV, 2014). Dicha red, a diferencias de Valparaíso en donde la red de grifos contra incendios se encuentra bajo la responsabilidad del distribuidor local de agua potable (SISS, 1993), es mantenida por la Oficina de Ingeniería y Suministro de Agua de San Francisco (City and Country of San Francisco , s.f.).

Comparando ambas realidades es posible percibir una falta de consciencia en Valparaíso, ciudad la cual pese a poseer todos los factores necesarios para la generación de incendios de magnitud, no reúne ningún plan preventivo coherente a dicho problema. Los planes preventivos realizados en otras partes del mundo, particularmente en San Francisco, dan muestra de que poseer un sistema de calidad no es solo un elemento deseable, sino imperioso, en ciudades con dichas características. El no corregir las actuales deficiencias en el mediano plazo afecta directamente a toda la comunidad, y en mayor medida a la población que reside en las zonas altas de los cerros, puesto son estos los lugares más propensos y con menor cobertura de grifos.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Determinar la localización óptima de grifos para una red independiente de alta presión en la ciudad de Valparaíso, con el fin de maximizar la cobertura global en la ciudad y satisfacer una cobertura mínima local en cada manzana. Lo anterior mediante modelos de programación matemática.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros a utilizar en el problema de cobertura, mediante el análisis de datos existentes y técnicas de mapeo, con el fin de implementar correctamente el modelo.
- Determinar las restricciones del problema, a través del análisis de estudios afines aplicados a la fecha, con el objetivo de obtener una solución factible al problema planteado.
- Desarrollar una integración del modelo de cobertura máxima con el modelo de cobertura total, mediante el estudio de literatura relacionada a modelos conjuntos, de tal forma de encontrar una mejor solución que su implementación por separado.

## 3 Marco Teórico

### 3.1 Situación actual

En el último siglo, la ciudad de Valparaíso ha sufrido una importante cantidad de incendios, los cuales han tomado gran cantidad de vidas y destruido viviendas y edificaciones, golpeando en repetidas ocasiones al pueblo porteño y afectando el desarrollo normal de la vida de sus ciudadanos (Tele13, 2015).

#### 3.1.1 Vulnerabilidad de la ciudad

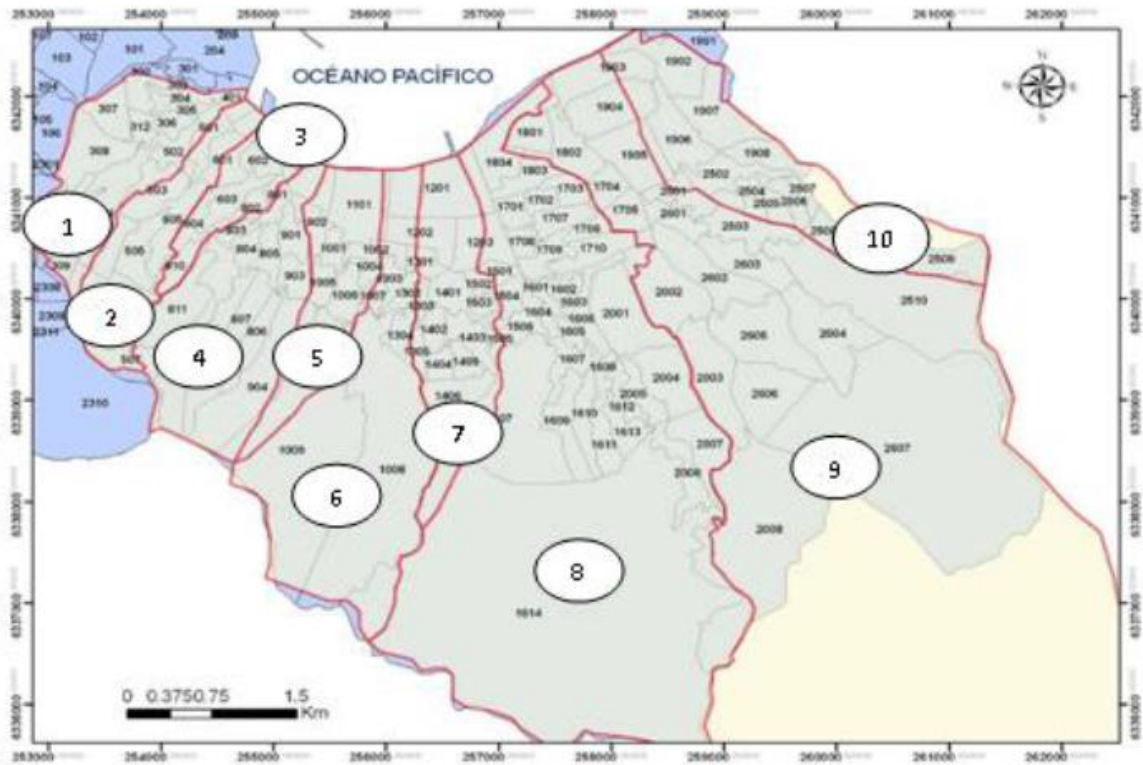
Uno de los principales motivos de este patrón de incendios en esta zona del país, es un conjunto de características geológicas, climáticas y sociales, que convierten ciertos sectores de la ciudad en zonas ideales para la formación y propagación de incendios (Reconstrucción Valparaíso , 2014).

El año 2011, el académico Uriel Padilla desarrolló una tesis dirigida a analizar tanto cuantitativa como cualitativamente la vulnerabilidad en ciertas zonas de Valparaíso. En un principio, se definieron 10 cuencas, las cuales están conformadas por un conjunto de cerros y limitadas por ejes de quebradas por donde escurren las aguas lluvias. Dichas cuencas muestran ciertas características similares dentro de ellas pero diferentes con las otras (Padilla, 2011). De este modo surgen las zonas apreciadas en la **Figura 3.1**.

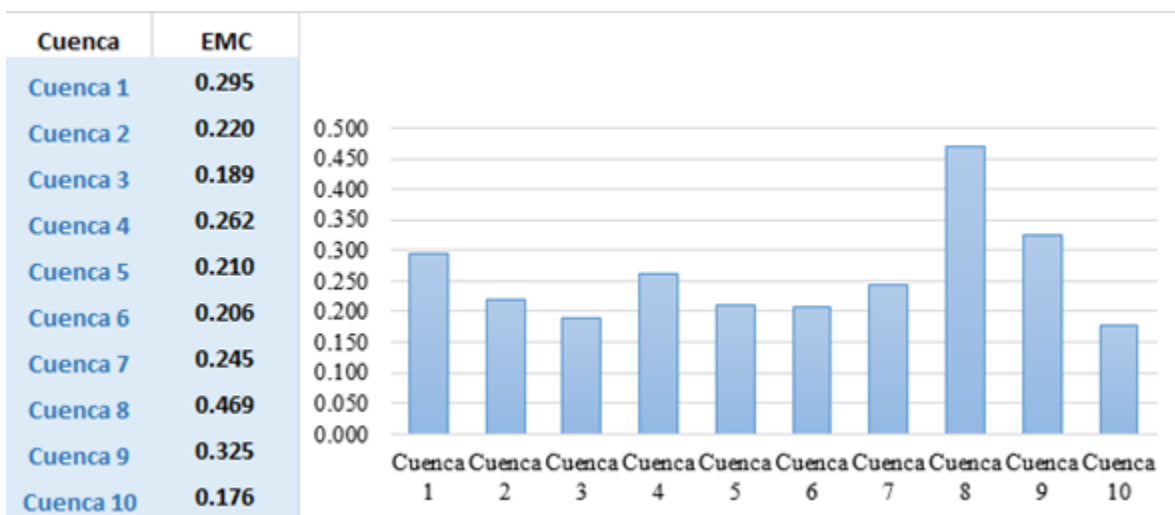
Posterior a ello, se determinaron factores de vulnerabilidad mediante una evaluación multicriterio, como lo es una ponderación de factores tecnológicos, referidos a los tipos y materialidad de las viviendas, factores sociales, referidos a las clases sociales y cantidad de estudios de los habitantes, factores territoriales, referidos a las áreas de riegos y desastres

pasados, y factores culturales, referidos a la tasa histórica de incendios y cantidad de basurales (Padilla, 2011). Los resultados de dicho estudio se presentan en la **Figura 3.2**.

**Figura 3.1:** Cuencas de la ciudad de Valparaíso. Fuente: (Padilla, 2011).

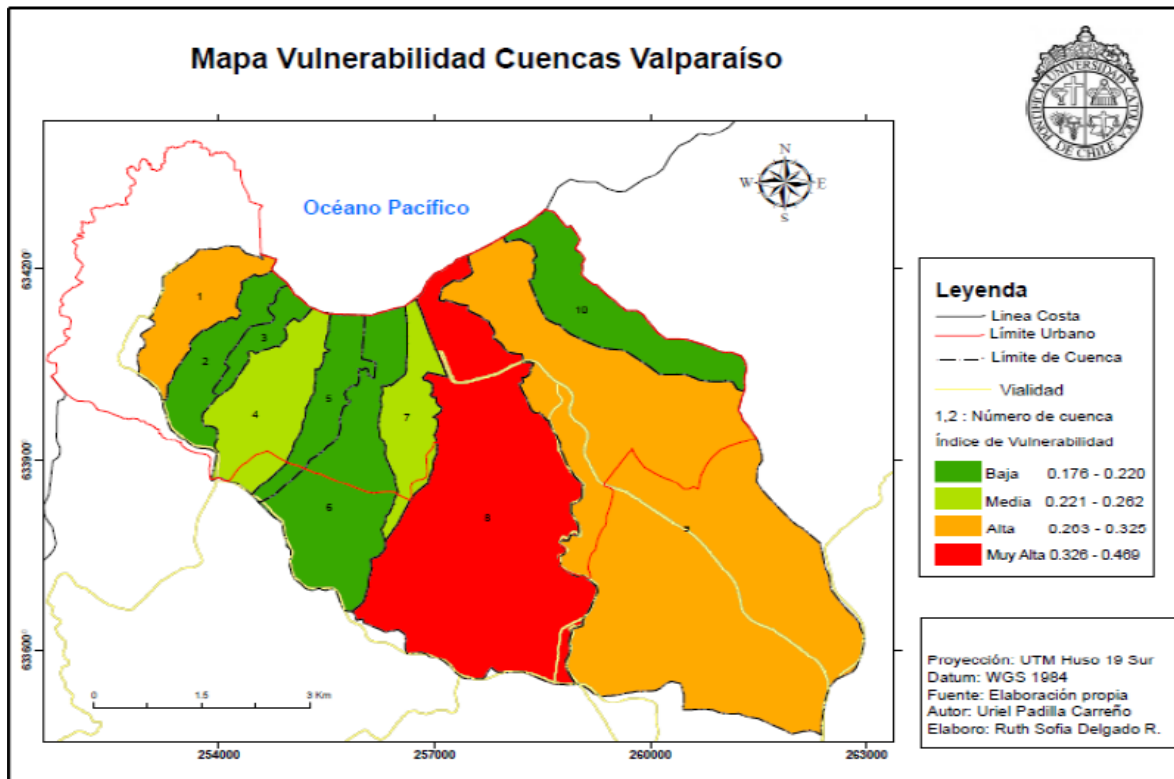


**Figura 3.2:** Ranking de vulnerabilidad Cuencas de Valparaíso. Fuente: (Padilla, 2011).



A partir de estos resultados, surge la **Figura 3.3** que muestra las zonas analizadas en el estudio realizado por el académico, desde una perspectiva más cualitativa de su vulnerabilidad.

**Figura 3.3:** Mapa Vulnerabilidad Cuencas Valparaíso. Fuente: (Padilla, 2011).



Padilla (2011) sugiere, desde estos resultados, realizar planes preventivos en las zonas más vulnerables, debido a que la probabilidad de que eventos de incendios u otros sigan ocurriendo es alta, y la ciudad requiere contar con sistemas preventivos que permitan enfrentarlos de manera eficiente.

### 3.1.2 Actual Red de Grifos en Valparaíso

El principal sistema de protección contra incendios en la zona urbana de Valparaíso, es su red de grifos. En primer lugar, la legislación chilena reconoce dos diferentes clases de

grifos dependiendo de la ubicación de estos, aquellos dispuestos en recintos privados, y otros ubicados en la vía pública, siendo estos últimos los grifos de interés para el presente estudio (SISS, 1993).

Básicamente, una red de grifos publica es un sistema compuesto de un alto número de bocas de riego, todas conectadas a una red de cañería alimentada por al menos una fuente de agua, cuya mantención está bajo la responsabilidad del distribuidor de agua potable de la zona, según dicta la ordenanza n°366 de la Superintendencia de Servicios Sanitarios. Su diseño permite abastecer de agua en todo momento a diferentes zonas de algún área geográfica, facilitando el trabajo de los Cuerpos de Bombero al momento de combatir un incendio (SISS, 1993).

### **3.1.2.1 Elementos de la red**

La actual red de grifos contra incendio de la ciudad de Valparaíso se compone de un total de 1500 grifos (ESVAL, s.f.), conectados a la red de agua potable de la ciudad, la cual a la vez es alimentada por varias fuentes de agua potable, donde la principal es la reserva Aconcagua (ESVAL, s.f.).

### **3.1.2.2 Normas**

En materia de las redes de grifos de Chile, los requisitos generales y de diseño son regulados por las normas NCh1646 y NCh691 respectivamente, siendo esta última la de interés para el presente estudio puesto regula tanto la localización como presión de la red.

### **3.1.2.2.1 Localización de grifos contra incendio**

Por un lado, la localización de esta se encuentra regulada por la Norma Chilena NCH691:2015, la cual indica que las distancias máximas entre los grifos y la línea oficial a la propiedad más alejada debe ser (NCh691:2015, 2015):

- En conjuntos con edificaciones aisladas o pareadas, la distancia a través de calles o pasajes, debe ser de 150 metros como máximo.
- En conjuntos con edificaciones continuas, constituidas por 3 a 50 unidades habitacionales, oficinas, locales comerciales, áreas definidas como industriales en los planos reguladores, u otras similares, la distancia a través de calles o pasajes debe ser de 100 metros como máximo.
- En conjuntos con edificaciones continuas, constituidas por más de 50 unidades habitacionales, oficinas, locales comerciales, u otras similares, la distancia a través de calles o pasajes debe ser de 50 metros como máximo.

### **3.1.2.2.2 Caudal de la matriz**

En referencia al caudal que pueden entregar los grifos, existen dos tipos, los que poseen un caudal de 16 litros por segundo instalados a cañerías de al menos 90 mm de diámetro interior, siendo estos la mayoría, y aquellos con un caudal mayor instalados a cañerías de al menos 175 mm, y que son aprobados previa solicitud para proteger zonas industriales o de mayor vulnerabilidad (NCh691:2015, 2015).

### **3.1.2.3 Deficiencias**

Pese a que toda la red de grifos se encuentra completamente regulada por las normas previamente descritas, existen importantes problemas que han dificultado históricamente la

labor de bomberos al combatir los incendios que se han producido en la zona. Este hecho quedó en evidencia durante el Gran Incendio de Valparaíso que tuvo lugar el año 2014, donde la red de grifos presentó importantes problemas de localización y de presión dificultando la tarea de bomberos (Chahuán, y otros, 2014).

Es así, que la red presenta, entre otros, dos principales problemas, la localización de los grifos y el caudal que estos pueden llegar a entregar.

#### **3.1.2.3.1 Problemas de localización**

En el año 2001, y posterior a un siniestro ocurrido en el cerro El Litre, el en ese entonces Comandante del Cuerpo de Bomberos de Valparaíso, Pierino Bavestrello, indicó que las zonas altas de la ciudad no cuentan con los grifos requeridos para combatir los incendios que se producen en dichas zonas, lo que obliga a los bomberos a realizar técnicas de “armadas” desde grifos ubicados hasta 200 metros del hecho del suceso (El Mercurio, 2001).

La situación lejos de cambiar, ha permanecido a lo largo de los años. Posterior a la catástrofe ocurrida en el año 2014, la comisión especial formada por dicho evento recomendó re urbanizar la parte alta de la ciudad como una medida a mediano plazo, puesto estas no se encuentran cubiertas por la red de cañerías y por tanto no están protegidas contra incendios (Chahuán, y otros, 2014).

#### **3.1.2.3.2 Problemas de presión**

El otro problema mencionado está referido a la presión de los grifos, es decir al caudal con el que es posible retirar el agua de estos. Según indicó el ex alcalde de la ciudad Jorge Castro, existen problemas cuando hay multiconcurrencia de carros de bombero, es decir, cuando se da la situación de que se retira agua de más de un grifo a la vez, estos pierden

presión reduciendo el caudal de agua, dificultando igualmente el actuar de bomberos (Emol, 2015).

Este problema se produce debido a que los grifos de la ciudad se encuentran conectados a una red de baja presión de agua potable, la que entrega el caudal necesario para un número reducido de grifos, siendo una red ineficiente para siniestros de alta magnitud (El Mercurio, 2001).

### **3.1.3 Proyectos de mejora realizados**

A lo largo de los últimos periodos, y en vista de los problemas mencionados, se han llevado a cabo algunos proyectos de mejora sobre la actual red contra incendio, ya sean obras menores como algunas de mayor magnitud.

Algunas de las obras menores mencionadas son sobre el alcantarillado y agua potable de ciertos cerros de la ciudad, además de la instalación de redes secundarias por impulsión, sin embargo estas son de un bajo caudal (Chahuán, et al, 2014). En cuanto a los proyectos más importantes realizados en la ciudad, son todos los referidos a la reconstrucción posterior al mega incendio ocurrido el año 2014, los que contemplan instalación de estanques de agua, nueva red de grifos, sistema georreferenciado, entre otros (Gobierno de Chile, 2014).

La primera parte del proyecto post incendio consistió en la instalación de estanques Australianos en 9 puntos de la ciudad, con capacidad de alrededor de los 200.000 litros cada uno. Este fue un proyecto coordinado entre bomberos y el gobierno de Chile. En su segunda parte el proyecto apuntó a mejorar la cobertura que la red entregaba en cierta área de la ciudad, esto por medio de la instalación de grifos dobles en 8 sectores, todos alimentados por

una matriz de alta presión y por ende con un mayor caudal disponible, como es posible apreciar en la **Figura 3.4**.

**Figura 3.4:** Proyecto mejora red de grifos. Fuente: *(Gobierno de Chile, 2014)*.



Por último también fue implementado un sistema georreferencial de uso exclusivo con la ubicación actual de toda la red, con la finalidad de disminuir el tiempo de respuesta del Cuerpo de Bomberos ante los diferentes siniestros (Gobierno de Chile, 2014).

### **3.1.4 Situación posterior a proyectos de mejora**

Si bien la red de grifos fue mejorada y se aumentaron la cantidad de fuentes de agua distribuidas en la ciudad, estas medidas no fueron completamente efectivas, dado que no se logró atacar al mismo tiempo los dos problemas previamente explicados, localización y presión. Por un lado, si bien se ubicaron estanques de agua en las zonas altas de la ciudad, la presión con la que esta podía ser extraída continuaba siendo baja, y por otro el lado si bien se ubicaron grifos de alta presión, estos fueron localizados en el centro de la ciudad, aun cuando son las zonas altas las que presentan mayor abandono.

Lo anterior queda en evidencia con el incendio producido en la parte alta de Playa Ancha el día 31 de Agosto de 2016, donde ya habiéndose finalizado todos los planes de mejoramiento, la labor de bomberos se vio dificultada por la baja presión de los grifos, dando como resultado 3 viviendas afectadas ( 24 Horas, 2016).

## **3.2 Caso San Francisco**

Las particularidades que presenta la ciudad de Valparaíso no son un hecho aislado en el mundo. San Francisco, Estados Unidos, es una ciudad con similar topografía y clima, que igualmente es una zona sísmica, y que por ende también ha tenido el tema de los incendios en su agenda durante toda su historia. La gran diferencia entre ambas ciudades, es que la ubicada en Norteamérica ha sabido actuar ante esto, y generar diversos planes de protección que la han convertido en una ciudad ejemplo para el resto del mundo (Manson, Connick, & Ransom, 1908).

### 3.2.1 Historia

La ciudad de San Francisco se encuentra ubicada en una zona costera, junto al océano pacífico, cuenta con un total de 50 colinas y una superficie de 121 km<sup>2</sup> (Wikipedia, 2017). Hasta el año 1900 la ciudad había presentado importantes problemas para controlar incendios, debido a que hasta ese entonces su red de grifos se encontraba conectada a la red pública de agua potable, y por ende existían problemas de presión a la hora de combatir incendios (Manson, Connick, & Ransom, 1908), los que por la naturaleza de la ciudad eran frecuentes.

El mes de Abril del año 1906, la ciudad fue sacudida por un fuerte terremoto de magnitud 7,8 Mw que ocasionó importantes daños en la ciudad. Dicho terremoto fue considerado como uno de los más graves hasta esa fecha (AECOM/AGS JV, 2014). Agravando más la situación, se concluyó que no fue el terremoto en si el responsable directo de los daños, sino que los incendios que se formaron producto de la rotura de las cañerías de gas, y que no pudieron ser combatidos eficientemente, debido a que las cañerías de agua publica a las que se encontraban conectados los grifos fueron igualmente dañadas por el mismo terremoto (Manson, Connick, & Ransom, 1908). En definitiva, cerca de un 80% de los daños fueron causados por estos incendios localizados en diferentes zonas de la ciudad. Un total de 3000 personas perdieron la vida y 28000 edificios resultaron destruidos. Las pérdidas fueron evaluadas en \$524 millones para el dólar de 1906, es decir, cerca de \$7,8 billones para el dólar de 2006 (AECOM/AGS JV, 2014).

En lo referente a la red de grifos y como ya fue mencionado, el sistema municipal de agua fue severamente dañado producto del movimiento telúrico, con 300 cañerías y 23000 conexiones de servicio rotas. Lo anterior provoco que no hubiera suficiente agua disponible

para combatir los cerca de 50 incendios formados producto del terremoto (AECOM/AGS JV, 2014).

Todo esto fue comprendido como un fuerte mensaje por parte de la ciudadanía, quienes entendieron que esto no solo era un hecho fortuito, sino algo que los había aquejado como ciudad durante largos años, y que probablemente continuaría ocurriendo y causando graves pérdidas si es que no se generaba un plan de respuesta. El gobierno, la ciudadanía y ciertas empresas privadas de la ciudad coincidieron en la implementación de un sistema auxiliar para combatir incendios, lo que si bien significaba una fuerte inversión inicial, se compensaría con los altos costos anuales que la comunidad y las empresas de seguro habían tenido que pagar hasta la fecha como motivo de prevención y reparación por los daños que los incendios ocasionaban (Manson, Connick, & Ransom, 1908).

### **3.2.2 Sistema municipal de suministro de agua (MWSS)**

El sistema municipal de suministro de agua, desde ahora MWSS, es aquel que abastece de agua potable tanto a las viviendas como a ciertos grifos contra incendio que aún continúan operativos. Hasta antes del terremoto de 1906, este sistema era prácticamente el único existente para combatir incendios, sin embargo dado que su principal misión es abastecer a los domicilios, es que su diseño se basó prioritariamente en reducir costos de material más que en resistir fuertes movimientos telúricos y entregar una presión elevada (Manson, Connick, & Ransom, 1908).

Este sistema se compone de aproximadamente 3870 grifos y 2000 km de cañerías, abastecidos de diferentes fuentes de agua, con capacidad total de 345 millones de litros. Si bien, se reconoce que los grifos están generalmente bien ubicados, el sistema que los alimenta

---

posee un tamaño insuficiente, no permitiendo que estos entreguen una presión deseada, además de no resistir terremotos de magnitud elevada (Manson, Connick, & Ransom, 1908).

### 3.2.3 Sistema auxiliar de suministro de agua (AWSS)

Durante el año 1908, el Ingeniero Civil Marsden Manson, bajo la dirección de “The National Board of Fire Underwriters”, desarrolló un reporte proponiendo un sistema auxiliar para el suministro de agua, desde ahora AWSS, para la ciudad de San Francisco, de modo que este sistema esté preparado para entregar una respuesta eficaz y eficiente ante cualquier catástrofe relacionada con incendios. El AWSS se compuso principalmente de un sistema de cañerías con diámetro suficiente para poseer una alta presión, que abastecerían únicamente a los nuevos grifos para combatir incendios, todo conectado a reservas de agua también comprometidas únicamente con dicho servicio, encontrándose completamente desligado del MWSS (Manson, Connick, & Ransom, 1908). Este sistema sería aprobado el mismo año para su implementación y completado en 1913 (AECOM/AGS JV, 2014).

#### 3.2.3.1 Área protegida por el AWSS

El área a ser protegida por el sistema descrito serían cerca de 21 km<sup>2</sup>, lo que representaba un 17% del territorio total de la ciudad. Esto se determinó luego de consultar con el experto P. H. Shaughnessy, Ingeniero en jefe del Departamento de Bomberos.

Con el fin de facilitar el análisis al momento de emplazar el sistema completo, se dividió esta área en 4 distritos, todos con características distintivas en cuanto a sus edificaciones y terreno que las componen. En la **Tabla 3.1** es posible apreciar las principales características de dichos distritos (Manson, Connick, & Ransom, 1908).

**Tabla 3.1:** Distritos dentro del área protegida. Fuente: (Manson, Connick, & Ransom, 1908)

<i>Distrito</i>	<i>Área [km<sup>2</sup>]</i>	<i>Características</i>
1	9,7	Es el distrito más importante puesto considera toda el área mayormente afectada en el terremoto de 1906. Se le denomina zona crítica.
2	1,6	Edificaciones no preparadas para soportas incendios. Algunas calles requieren ser pavimentadas. Es difícil mover aparatos para combatir incendios.
3	4,45	No posee áreas críticas.
4	7,69	No posee áreas críticas sin embargo sus edificaciones están obligadas a utilizar materiales ante incendio.

Acogiendo la recomendación del comité de apoyo, quienes contaban con amplia experiencia en el área de incendios de magnitud, se optó por desarrollar un sistema capaz de entregar 946 litros de agua por segundo en cualquier área de 9290 m<sup>2</sup> dentro de la zona crítica, o entre 505 y 757 l/s para los otros distritos del área protegida, también en un área de 9290 m<sup>2</sup> (Manson, Connick, & Ransom, 1908).

### 3.2.3.2 Principales características del AWSS

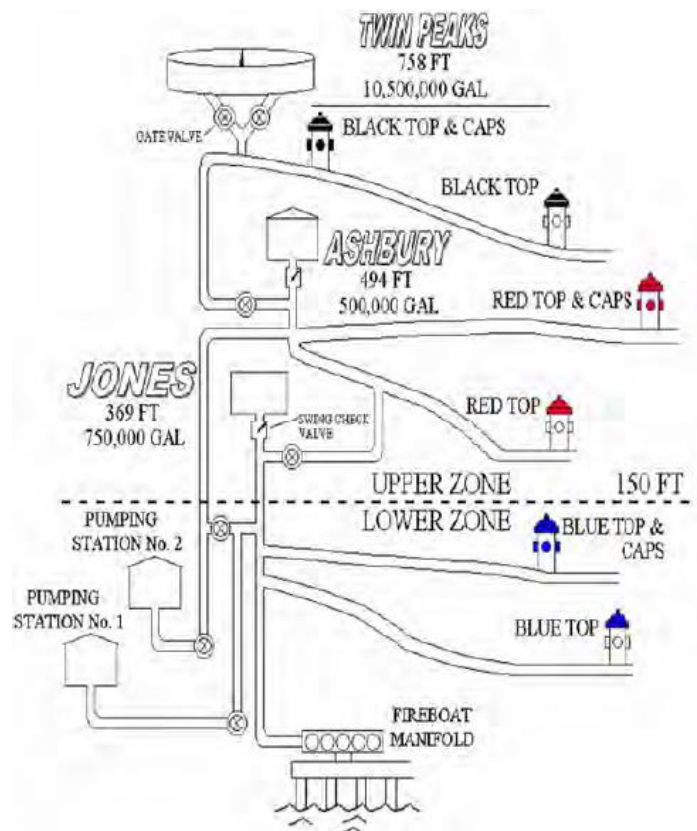
Con el fin de cubrir el área protegida, el plan desarrollado contempló los siguientes puntos en relación al suministro de agua fresca (Manson, Connick, & Ransom, 1908):

- 1 reserva de almacenamiento de agua, llamada reserva Twin Peaks, con capacidad de 38 millones de litros, ubicada a 230 metros sobre el nivel del mar (msnm).

- 2 tanques de distribución, uno para zona alta, llamada Ashbury, y otra para zona baja, llamada Jones, con capacidades de 1,9 millones y 2,8 millones de litros respectivamente, la primera ubicada a 150 msnm y la segunda a 112 msnm.
- Presión en el sistema de 325 psi para la distribución de agua.
- 2 estaciones de bombeo de agua fresca con capacidad combinada de 132 l/s.

El área a proteger, además de dividirse en 4 distritos, se dividió en tres zonas según su altura sobre el nivel del mar: zona Twin Peaks para ciertos grifos ubicados sobre 91 msnm, zona alta para grifos ubicados entre 46 y 152 msnm, y zona baja, menos de 46 msnm, como se señala en la **Figura 3.5** (AECOM/AGS JV, 2014).

**Figura 3.5:** Esquema de presión AWSS. Fuente: (AECOM/AGS JV, 2014).



### **3.2.3.2.1 Presión del sistema**

En referencia a la presión del sistema, se estimó que las pérdidas por fricción debían ser de a lo más 98 psi para la zona crítica de la ciudad, esto dado que la presión efectiva para combatir incendios debe ser de al menos 75 psi para los grifos ubicados en la zona crítica. Lo anterior se sustenta en que la presión estática en el sistema sería de 327 psi, lo que al estimar una pérdida de a lo más 98 psi se lograría una presión dinámica en la boca del grifo de cerca de 229 psi, para luego sufrir una pérdida entre grifo y manguera de 154 psi, resultando en una presión efectiva de 75 psi. Cabe señalar que al estar las dos estaciones de bombeo cerca de la zona centro, no deberían existir problemas de presión en el sistema (Manson, Connick, & Ransom, 1908).

Todo lo anterior es para emergencias extremas, por lo que una presión de 100 psi en la boca del grifo será suficiente para incendios ordinarios. En consecuencia, la presión estática de la red será de 150 psi normalmente, con la posibilidad de aumentarla a 325 psi en la zona crítica con el apoyo de las reservas anteriormente descritas. Durante el funcionamiento normal del sistema, solo un 50% de la reserva Twin Peaks permanecerá conectada con el sistema de distribución y los dos tanques de distribución abastecerán solamente a su respectiva zona. Ante situaciones de emergencia es posible activar la reserva Twin Peaks en su totalidad además de conectar los dos tanques de distribución (Manson, Connick, & Ransom, 1908).

### **3.2.3.2.2 Disposición de grifos**

En relación a los nuevos grifos que cubrirían la ciudad, se instalaron un total de 889 grifos conectados a la AWSS (AECOM/AGS JV, 2014), estos serían localizados en su mayor

parte en la zona crítica de San Francisco, cumpliendo los siguientes puntos (Manson, Connick, & Ransom, 1908):

- Mangueras de 122 m de largo.
- 946 l/s deben poder ser concentrados en cualquier área de 9290 m<sup>2</sup> dentro de la zona crítica de la ciudad
- En otras zonas de los distritos protegidos, los grifos serán situados de tal forma de entregar entre 505 y 757 l/s en cualquier área de 9.290 m<sup>2</sup>.
- La conexión entre grifo y cañería será de 20,32 cm de diámetro.
- Es deseable que la red de agua se ubique en el lado opuesto de la calle que la red de gas.
- Siempre y cuando sea posible, el grifo será ubicado en la zona opuesta de la calle a la cañería.
- Generalmente, los grifos no deberían exceder los 60 m y 76 m de distancia entre si dentro de la zona critica.
- En las zonas más alejadas se encontraran separados por hasta 122 m, con extremos de 274 m.

### **3.2.3.3 Equipo de apoyo**

De modo de complementar el sistema de cañerías que abastece a los grifos, también se dispuso del siguiente equipo de apoyo para combatir incendios (Manson, Connick, & Ransom, 1908):

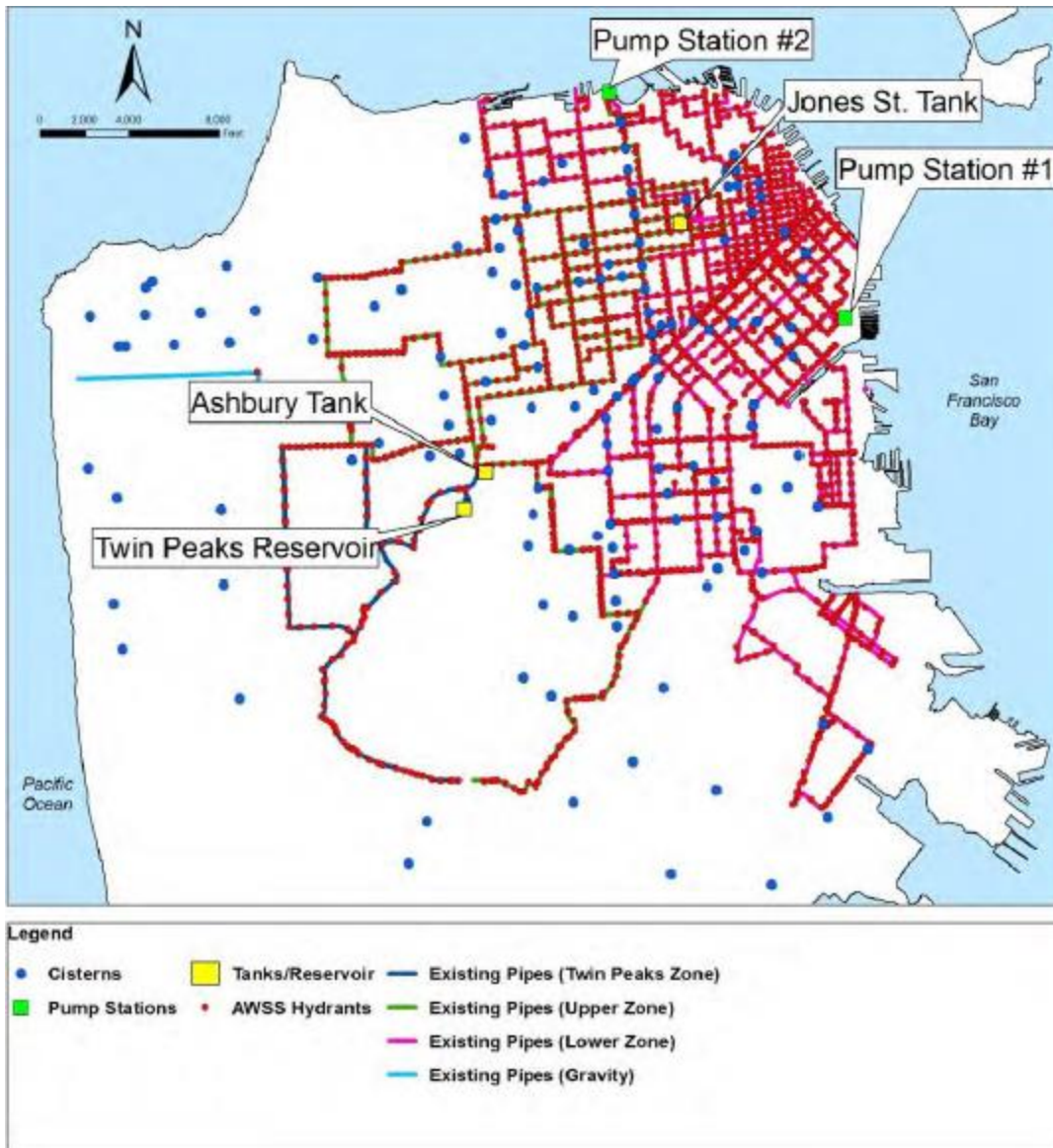
- 2 estaciones de bombeo de agua salada, cada una con capacidad de 631 l/s por 72 horas, con posibilidad de aumentar a 1009 l/s por 48 horas, ocupadas solo bajo casos de emergencia.
- 2 botes contra incendio, cada uno con capacidad de 505 l/s a una presión de 150 psi, o 227 a 300 psi.
- 154 cisternas ubicadas bajo tierra con capacidad promedio 284 mil litros.

### **3.2.4 Proyectos de mejora y trabajos futuros**

Con el objetivo de mantener el AWSS como un sistema moderno a lo largo de los años, el Departamento de Ingeniería de la ciudad ha realizado varios proyectos de mejora y ampliación sobre el mismo, los principales en los años 1930, 1970 y 1980.

Para el año 2014 el sistema se había extendido notablemente, pasando de una red de 116 km y 889 grifos instalados originalmente (AECOM/AGS JV, 2014), a un total de 1550 grifos y una red de 241 km (Van Dyke, s.f.). Su última configuración puede ser apreciada en la **Figura 3.6.**

**Figura 3.6:** Actual AWSS. Fuente: (AECOM/AGS JV, 2014).



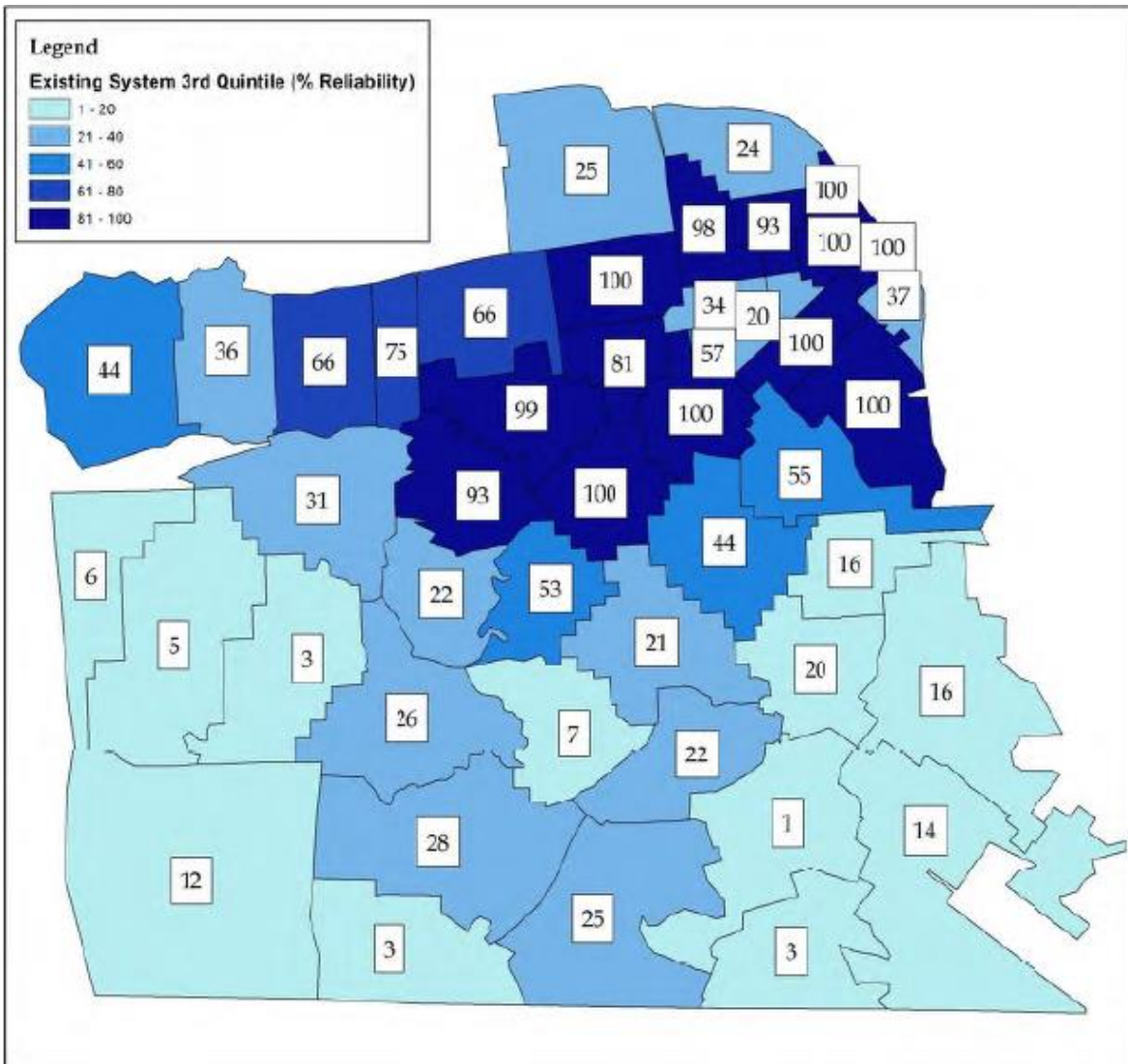
Uno de los proyectos recientes sobre el AWSS fue desarrollado en el año 2014. Uno de los objetivos de dicho estudio fue determinar el nivel real de servicio del actual sistema sobre las distintas áreas de la ciudad si se presentará un terremoto como el ocurrido en el año 1906, de manera de proponer mejoras que maximicen la probabilidad de que el sistema efectivamente provea el servicio requerido (AECOM/AGS JV, 2014).

El nivel de servicio fue calculado como se detalla a continuación (AECOM/AGS JV, 2014):

- a) Se definieron 46 diferentes áreas en función de sus características y respuesta a incendios (FRA, 46 totales).
- b) Se determinó el número de igniciones derivadas de un terremoto de 7,8 Mw San Andreas earthquake, dada la mayor aceleración de la tierra posible. Esto mediante análisis Monte Carlo.
- c) Se determinó las zonas de más probable número de igniciones.
- d) Se estimó la demanda y ubicación de incendios para cada área.
- e) Se calculó la confiabilidad promedio en cada zona mediante la iteración de múltiples posibles escenarios, determinando confiabilidad como agua total entregada dividido en agua total demandada.
- f) Se calculó confiabilidad total.

En la **Figura 3.7** es posible observar la confiabilidad en cada una de las 46 áreas analizadas producto de la simulación realizada. Se concluyó que la zona crítica de la ciudad era la que presentaba mayor confiabilidad, esto ya que el sistema original se basó principalmente en satisfacer la demanda de dicha zona. Como objetivos futuros, se plantea realizar lo necesario para que el AWSS tenga una confiabilidad de al menos un 50% en cada zona (FRA), y un 90% en el promedio total (AECOM/AGS JV, 2014).

**Figura 3.7:** Confiabilidad de suministro de agua actual del sistema. Fuente: (AECOM/AGS JV, 2014).



### 3.3 Modelos matemáticos de localización

Los modelos matemáticos de localización permiten resolver problemas de colocación de recursos. En este sentido, y dado un conjunto de nodos candidatos, estos modelos permiten determinar la localización óptima para satisfacer una demanda dada, priorizando factores como cobertura, costos, u otros, dependiendo de la naturaleza del problema

Debido a que el actual problema contempla un servicio público, es decir, se busca el bienestar de las personas por sobre los costos que la propuesta en sí pueda generar, es que se analizaran modelos de cobertura, esto es, favorecer la demanda cubierta por sobre los costos al momento de instalar servidores, para lo cual se consideran los siguientes términos:

- **Nodo demanda:** Punto donde se concentra una cierta cantidad de demanda
- **Nodo candidato:** Punto donde es posible instalar un servidor. Estos nodos son predeterminados.
- **Radio de cobertura:** Distancia máxima a la cual debe estar ubicado el servidor para que la demanda se considere “atendida”.
- **Demanda cubierta:** Si el nodo demanda está dentro del radio de cobertura de un servidor.

Para resolver el problema de localización existen varios posibles modelos a utilizar, y su selección dependerá finalmente de las características del problema.

### **3.3.1 Location Set Covering Problem (LSCP), Toregas**

El modelo LSCP, o modelo de localización con cobertura total, es un modelo de localización discreta, que busca encontrar el número mínimo de servidores, entre una cantidad finita de posibilidades, de manera que todo nodo demanda este cubierto por al menos un servidor, esto dentro de un radio de cobertura máximo (Toregas, 1970).

A continuación se presenta la formulación matemática del problema.

**Modelo Extendido:**

Conjuntos:

$I$  = Conjunto de nodos demanda

$J$  = Conjunto de nodos candidatos

Conjuntos indexados:

$N_i$  = Conjunto de nodos candidatos  $j$  cuya distancia con el nodo demanda  $i$  es menor al radio de cobertura máximo  $S$

Parámetros:

$S$  = Radio de cobertura

$d_{ij}$  = Distancia mínima entre el nodo demanda  $i$  y el nodo candidato  $j$

Variables:

$X_j$  =  $\begin{cases} 1, & \text{si se instala un servidor en } j \\ 0, & \sim \end{cases}$

Restricciones:

*R1: Todo nodo demanda debe estar cubierto por al menos un servidor.*

$$\sum_{j \in N_i} X_j \geq 1 \quad \forall i \in I$$

*R2: Naturaleza de las variables.*

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J$$

**Modelo Compacto:**

$$\text{LSCP} \left\{ \begin{array}{l} \min_x \sum_{j \in J} X_j \quad (3.1) \\ s. t. \\ \sum_{j \in N_i} X_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.2) \\ X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.3) \end{array} \right.$$

Si bien este modelo no discrimina por la cantidad de demanda de cada nodo demanda, y tampoco considera restricciones presupuestarias, permite introducir el concepto de que cada nodo demanda debe ser abastecido por al menos un servidor, concepto importante que será analizado más adelante.

**3.3.2 Maximal Covering Location Problem (MCLP), Church & Reville**

El modelo MCLP, o modelo de localización con máxima cobertura, es también un modelo de localización discreta para varias instalaciones. Su objetivo es localizar una cantidad finita de instalaciones de modo de maximizar la cobertura entregada, es decir, cubrir la máxima demanda posible, esto dentro de un radio de cobertura determinado (Church & Reville, 1974).

A continuación se presenta la formulación matemática del problema.

**Modelo Extendido:**

Conjuntos:

$I$  = Conjunto de nodos demanda

$J$  = Conjunto de nodos candidatos

Conjuntos indexados:

$N_i$  = Conjunto de nodos candidatos  $j$  cuya distancia con el nodo demanda  $i$  es menor al radio de cobertura máximo  $S$

Parámetros:

$S$  = Radio de cobertura

$d_{ij}$  = Distancia mínima entre el nodo demanda  $i$  y el nodo candidato  $j$

$p$  = Máximo número de instalaciones a instalar

$h_i$  = Demanda del nodo  $i$

Variables:

$X_j$  =  $\begin{cases} 1, & \text{si se instala un servidor en } j \\ 0, & \sim \end{cases}$

$Y_i$  =  $\begin{cases} 1, & \text{si el nodo } i \text{ está cubierto por un servidor} \\ 0, & \sim \end{cases}$

Restricciones:

*R1: A lo más instalamos  $p$  servidores.*

$$\sum_{j \in J} X_j \leq p$$

*R2: Un nodo demanda no puede estar cubierto a menos que haya un servidor en su vecindad.*

$$Y_i \leq \sum_{j \in N_i} X_j \quad \forall i \in I$$

R3: Naturaleza de las variables.

$$X_j, Y_i \in \{0,1\} \forall j \in J, i \in I$$

**Modelo Compacto:**

$$\text{MCLP} \left\{ \begin{array}{l} \text{Max}_{x,y} \sum_{i \in I} h_i * Y_i \quad (3.4) \\ \text{s. t.} \\ Y_i \leq \sum_{j \in N_i} X_j \quad \forall i \in I \quad (3.5) \\ \sum_{j \in J} X_j \leq p \quad (3.6) \\ X_j, Y_i \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, i \in I \quad (3.7) \end{array} \right.$$

La utilidad de este modelo, es que a diferencia del anterior, permite priorizar por la cantidad de demanda, instalando los servidores en función de cubrir los nodos demanda más críticos o importantes. Por otro lado introduce el concepto de número finito de instalaciones, lo que lo acerca más a un problema real donde los recursos son de igual modo limitados. Sin embargo, no permite asignar un nivel de servicio mínimo a cada nodo demanda, como si lo hacia el primer modelo revisado.

### 3.3.3 MCLP con cobertura obligatoria

Este modelo de localización discreta para varias instalaciones, tiene por objetivo, al igual que el MCLP, maximizar la cobertura entregada instalando una cantidad finita de instalaciones, pero con la diferencia de que todo nodo demanda debe estar cubierto por al menos un servidor, permitiendo entregar un nivel de servicio mínimo, en otras palabras, es una combinación entre los dos modelos revisados anteriormente.

A continuación se presenta la formulación matemática del problema.

**Modelo Extendido:**

Conjuntos:

$I$  = Conjunto de nodos demanda

$J$  = Conjunto de nodos candidatos

Conjuntos indexados:

$N_i^1$  = Conjunto de nodos candidatos  $j$  cuya distancia con el nodo demanda  $i$  es menor al radio de cobertura máximo  $S_1$

$N_i^2$  = Conjunto de nodos candidatos  $j$  cuya distancia con el nodo demanda  $i$  es menor al radio de cobertura máximo  $S_2$

Parámetros:

$S_1$  = Radio de cobertura máximo

$S_2$  = Radio de cobertura obligatorio

$d_{ij}$  = Distancia mínima entre el nodo demanda  $i$  y el nodo candidato  $j$

$p$  = Máximo número de instalaciones a instalar

$h_i$  = Demanda del nodo  $i$

Variables:

$X_j$  =  $\begin{cases} 1, & \text{si se instala un servidor en } j \\ 0, & \sim \end{cases}$

$Y_i$  =  $\begin{cases} 1, & \text{si el nodo } i \text{ está cubierto por un servidor} \\ 0, & \sim \end{cases}$

Restricciones:

R1: Se puede instalar a lo más  $p$  servidores.

$$\sum_{j \in J} X_j \leq p$$

R2: Un nodo demanda no puede estar cubierto en un radio  $S_1$  a menos que haya un servidor en  $N_i^1$ .

$$Y_i \leq \sum_{j \in N_i^1} X_j \quad \forall i \in I$$

R3: Cada nodo demanda debe estar cubierto en un radio  $S_2$  por al menos un servidor.

$$\sum_{j \in N_i^2} X_j \geq 1 \quad \forall i \in I$$

R4: Naturaleza de las variables.

$$X_j, Y_i \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, i \in I$$

**Modelo Compacto:**

$$\begin{array}{l}
 \text{MCLP con cobertura obligatoria} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Max}_{x,y} \sum_{i \in I} h_i * Y_i \quad (3.8) \\
 \text{s. t.} \\
 Y_i \leq \sum_{j \in N_i^1} X_j \quad \forall i \in I \quad (3.9) \\
 \sum_{j \in N_i^2} X_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.10) \\
 \sum_{j \in J} X_j \leq p \quad (3.11) \\
 X_j, Y_i \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, i \in I \quad (3.12)
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Finalmente, es este último modelo el que se acerca más a las necesidades del actual proyecto, debido a que por un lado y como se mencionó anteriormente, existen zonas más críticas que otras, y por lo tanto es importante asignar una demanda diferenciada para localizar los grifos en función de las distintas necesidades que existen en las diferentes zonas de la ciudad, pero a la vez, poder asegurar un nivel mínimo de servicio en cada punto de la localidad, de modo que ninguna zona presente problemas de abandono, y existan suficientes instalaciones para hacer frente a una posible catástrofe aun cuando las probabilidades de ocurrencia sean menores en ciertas partes.

## 4 Formulación del modelo

En esta sección se describen de forma detallada los problemas de optimización abordados en el presente informe, y se presentan sus modelos extendidos y compactos. Además se señalan las modificaciones realizadas a los problemas LSCP, MCLP y MCLP con cobertura obligatoria según sea el caso.

### 4.1 Problema 1

#### 4.1.1 Descripción P1

Considere la ciudad de Valparaíso una región acotada y dividida por  $K$  ( $k=1, \dots, |K|$ ) cuencas, cada una con un área igual a  $AC_k$  y con vulnerabilidad ante incendios  $z_k$ , donde  $z_k \in [0,1]$ .

Por otro lado, existen  $J$  ( $j = 1, \dots, |J|$ ) grifos potenciales a ser localizados a lo largo y ancho de dicha superficie, cada uno de ellos con oferta  $l_j$ . Sean además  $I$  ( $i=1, \dots, |I|$ ) manzanas con demanda  $h_i$  a ser cubiertas, cada una con una superficie cuadrada de área igual a  $AM_i$ , donde cada una pertenece a una y solo una cuenca  $k$ , dado por una matriz binaria  $M_{ki}$ , con valor 1 si la manzana  $i$  pertenece a la cuenca  $k$  y 0 sino. La distancia entre cada grifo  $j$  y cada manzana  $i$  es igual a  $d_{ij}$  (en el plano bidimensional).

Se considera por otro lado que una manzana  $i$  estará total o parcialmente cubierta, dependiendo de la cantidad de oferta de grifos  $j$  instalados dentro de un radio de cobertura no mayor a  $S$  de la manzana  $i$ . Dado que la ciudad de Valparaíso es una zona con fuertes pendientes, marcadas para cada cuenca  $k$ , se considera  $v_k$  como el ajuste por inclinación del radio de cobertura al plano bidimensional.

Para efectos del presente estudio, se considera en un primer escenario que cada manzana perteneciente a la cuenca  $k$  tiene una fracción mínima  $\varphi_k$  que debe ser cubierta obligatoriamente, y en un segundo escenario que no existe un nivel mínimo de cobertura para una manzana, es decir, que su nivel mínimo de cobertura es 0. Se considera para ambas situaciones una cantidad de  $p$  grifos a ser instalados como máximo.

El objetivo del problema es maximizar la demanda global cubierta, ajustada por el nivel de vulnerabilidad, es decir, la fracción de demanda cubierta para cada manzana  $i$  multiplicada por su vulnerabilidad  $z_k$ .

#### 4.1.2 Modelo extendido P1

##### Conjuntos.

$K$  = Conjunto de cuencas, indexado por  $k = 1, \dots, |K|$ .

$J$  = Conjunto de lugares potenciales para instalar un grifo, o nodos oferta, indexado por  $j = 1, \dots, |J|$ .

$I$  = Conjunto de manzanas, o nodos demanda, indexado por  $i = 1, \dots, |I|$ .

##### Conjuntos indexados.

$N_k^1$  = Conjunto de manzanas  $i$  que pertenecen a la cuenca  $k$ .

$N_i^2$  = Conjunto de grifos  $j$  que se encuentran a una distancia máxima  $S$  de la manzana  $i$ , corregida al plano bidimensional.

##### Parámetros.

$h_i$  = Demanda de caudal de la manzana  $i$ .

---

$l_j$	=	Oferta de caudal del grifo j.
$S$	=	Radio de cobertura máximo.
$p$	=	Máximo número de grifos a instalar.
$AM_i$	=	Área de la manzana i.
$z_k$	=	Criticidad de la cuenca k.
$v_k$	=	Ajuste del radio de cobertura S al plano bidimensional en la cuenca k.
$\varphi_k$	=	Fracción mínima de la demanda a ser cubierta en cada manzana perteneciente a la cuenca k
$AC_k$	=	Área de la cuenca k.
$M_{ki}$	=	Matriz de pertenencia de una manzana i a una cuenca k.
$d_{ij}$	=	Menor distancia desde la manzana i al grifo j en el plano bidimensional.

Variables.

$X_j$	=	$\begin{cases} 1, & \text{si se instala un servidor en } j \\ 0, & \sim \end{cases}$
$Y_i$	=	Fracción de la demanda cubierta en la manzana i.

Restricciones.

*R1: La fracción total de la demanda que puede ser cubierta en la manzana i está limitado por la oferta que exista dentro de su radio de cobertura.*

$$Y_i \leq \frac{\sum_{j \in N_i^2} X_j * l_j}{h_i} \quad \forall i \in I$$

R2: Toda manzana  $i$  perteneciente a la cuenca  $k$  debe ser cubierta en una fracción mínima  $\varphi_k$  de su demanda.

$$\varphi_k * h_i \leq \sum_{j \in N_i^2} X_j * l_j \quad \forall k \in K, i \in N_k^1$$

R3: No se pueden instalar más de  $p$  grifos.

$$\sum_{j \in J} X_j \leq p$$

R4: Naturaleza de las variables.

$$X_j \in \{0,1\} \forall j \in J, Y_i \in [0,1] \forall i \in I$$

#### Función Objetivo.

$$\text{Max}_{x,y} \sum_{k \in K, i \in N_k^1} z_k * h_i * Y_i$$

Es posible observar, como se indicó en el punto anterior, que la función objetivo busca maximizar el nivel de demanda cubierta pero tomando en cuenta la criticidad de cada manzana, de esta forma aquellas que se encuentren ubicadas en cuencas más críticas tendrán mayor impacto en la función objetivo.

Se procede a señalar las principales características del modelo y sus diferencias con el modelo MCLP con cobertura obligatoria, modelo base utilizado para la formulación del presente.

La principal y más notable diferencia entre ambos modelos es la forma de tratar los niveles de servicio. Así, mientras el modelo base utiliza dos radios de cobertura, uno menor para un nivel de servicio mayor sobre el cual busca maximizar, y otro mayor para un nivel de servicio menor a ser obligatoriamente cubierto, el actual modelo lo ve desde el punto de vista de la oferta y la demanda. Esto se explica en que el nivel de servicio para un problema de localización de grifos no está sujeto únicamente a la distancia de estos de la manzana, debido a que si se ubica un grifo a una distancia mayor del largo de una manguera, el nivel de servicio no solo disminuye, sino que se vuelve nulo. Es así, como ahora el nivel de servicio estará dado por el nivel de demanda cubierta que presente cada manzana, es decir, por la cantidad de grifos que existan alrededor, utilizándose así el mismo radio de cobertura tanto para el problema de maximización como para el de cobertura obligatoria, pero exigiéndose distintos niveles de demanda a satisfacer.

De esta forma, el presente modelo incluye parámetros no considerados en el problema original, como lo son parámetros de oferta y demanda, y elimina otros como lo es un radio de cobertura diferenciado. Además, la variable  $Y_i$  pasa de ser una variable binaria a una continua entre 0 y 1, con el objetivo de no presentar únicamente dos estados, sino que tener la opción de variar dependiendo de la fracción de la demanda cubierta por los grifos instalados en su radio.

Por otro lado, el parámetro  $v_k$  tiene por objetivo hacer comprobables los parámetros  $S$  y  $d_{ij}$ , eliminando el ángulo de desfase entre uno y otro, dado que el primero se encuentra para el plano tridimensional y el último para el plano bidimensional.

Finalmente, las restricciones que presentan discrepancias con el modelo base son la 1 y la 2. Partiendo por la 1, al ser la variable  $Y_i$  ahora continua, se hace necesario agregar los parámetros de oferta y demanda, permitiendo que esta aumente según el número de grifos activados en su vecindad, hasta un máximo de 1 cuando la oferta acumulada sea igual o mayor a  $h$ . Ahora bien la restricción 2, conocida como la del nivel de servicio obligatorio, ya no tiene por propósito activar un único servidor en un radio de cobertura mayor, sino que busca activar la suficiente oferta en el mismo radio de cobertura usado para la restricción 1, pero ahora buscando satisfacer un nivel de demanda especificado y dado según la cuenca en la que se encuentre la manzana.

Cabe recordar, como se indicó previamente, que la restricción 2 se utilizará para una primera instancia del problema P1, donde posteriormente esta se eliminará para estudiar el comportamiento del problema sin la limitación a cumplir un nivel mínimo de demanda. Para este último caso el problema P1 pasará a acercarse más a un modelo MCLP, pero con sus respectivas variaciones como fue preliminarmente explicado.

### 4.1.3 Modelo compacto P1

$$\begin{cases}
 \text{P1} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Max}_{x,y} \sum_{k \in K, i \in N_k^1} z_k * h_i * Y_i & (4.1) \\
 \text{s. t.} \\
 Y_i * h_i \leq \sum_{j \in N_i^2} X_j * l_j \quad \forall i \in I & (4.2) \\
 \varphi_k * h_i \leq \sum_{j \in N_i^2} X_j * l_j \quad \forall k \in K, i \in N_k^1 & (4.3) \\
 \sum_{j \in J} X_j \leq p & (4.4) \\
 X_j \in \{0,1\}, Y_i \in [0,1] \quad \forall j \in J, i \in I & (4.5)
 \end{array} \right.
 \end{cases}$$

El problema P1 es del tipo Linear Problem, dado que no existe multiplicación ni división de variables ni en las restricciones ni en la función objetivo del problema. Es por esto que el problema será resuelto mediante el uso del Solver CPLEX.

## 4.2 Problema 2

### 4.2.1 Descripción P2

El problema P2 busca encontrar aquel número mínimo de grifos a ser activados para entregar un nivel de cobertura global igual a  $\alpha$ , y parcial en cada cuenca igual a  $\beta_k$ . De esta forma, aquí no existe restricción de número de grifos a instalar.

### 4.2.2 Modelo extendido P2

Conjuntos.

*Ídem P1.*

Conjuntos indexados.

*Ídem P1.*

Parámetros.

Ídem P1 exceptuando parámetros  $p$  y  $z_k$  los cuales se eliminan. Se agregan parámetros:

$\alpha$  = Nivel de cobertura global mínimo exigido.

$\beta_k$  = Nivel de cobertura de la cuenca  $k$  mínimo exigido.

Variables.

Ídem P1.

Funciones de variables

$PAC_k$  = Fracción del área cubierta en la cuenca  $k$ .

$$PAC_k = \frac{\sum_{i \in N_k^1} Y_i * AM_i}{AC_k}$$

$PACT$  = Fracción del área cubierta total (en todas las cuencas).

$$PACT = \frac{\sum_{k \in K} PAC_k * AC_k}{\sum_{k \in K} AC_k}$$

Restricciones.

Se conservan Restricciones 1, 2 y 4 de P1, se elimina Restricción 3. Se agregan las siguientes.

R5: Cada cuenca  $k$  debe presentar una cobertura mínima de  $\beta_k$ .

$$PAC_k \geq \beta_k \quad \forall k \in K$$

R6: La cobertura total debe ser al menos  $\alpha$ .

$$PACT \geq \alpha$$

Función Objetivo.

$$\text{Min}_x \sum_{j \in J} X_j$$

Se observa que ahora, a diferencia del problema anterior, se tiene una función objetivo de minimización. El objetivo es encontrar aquel número mínimo de grifos que cumplan con las restricciones de cobertura mínima a nivel manzana, a nivel cuenca, y a nivel global.

Este modelo está basado en el modelo LSCP, pero básicamente con dos importantes diferencias. Primero por su cantidad de restricciones, ya no solo se tiene por objetivo satisfacer condiciones mínimas de cobertura en cada nodo demanda, sino que además se exige un nivel de cobertura mínima por cuenca y un nivel mínimo a nivel global. Segundo, en la forma de presentar la restricción de cobertura mínima, y esto se debe a que en el modelo LSCP se necesita un único servidor para satisfacer la demanda de un nodo demanda, y en el actual problema esto no es así necesariamente.

### 4.2.3 Modelo compacto P2

$$\begin{cases}
 \text{Min}_{x,y} \sum_{j \in J} X_j & (4.6) \\
 \text{s. t.} & \\
 Y_i * h_i \leq \sum_{j \in N_i^2} X_j * l_j \quad \forall i \in I & (4.7) \\
 \varphi_k * h_i \leq \sum_{j \in N_i^2} X_j * l_j \quad \forall k \in K, i \in N_k^1 & (4.8) \\
 \beta_k \leq PAC_k \quad \forall k \in K & (4.9) \\
 \alpha \leq PACT & (4.10) \\
 X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, Y_i \in [0,1] \quad \forall i \in I & (4.12)
 \end{cases}$$

Al igual que los modelos anteriores, el presente modelo (P2) es un Linear Problem, por lo que su resolución se llevara a cabo por el Solver CPLEX.

## 5 Estudio computacional

Este capítulo contempla dos secciones, por un lado se indican los métodos y supuestos utilizados para la recolección de la data requerida para los problemas ya descritos, y por otro se presentan los estudios numéricos con sus respectivos resultados.

Se señalan a continuación los objetivos a lograr con los estudios computacionales:

1. Determinar la localización óptima de una cantidad definida de grifos en la ciudad de Valparaíso para maximizar la cobertura global de la ciudad.
2. Analizar el aumento en la cobertura al aumentar también la cantidad de grifos a instalar, y como estos se distribuyen en comparación a las instancias anteriores.
3. Estudiar diferencias en el comportamiento del modelo al no restringirlo a una cobertura mínima por manzana.
4. Determinar el mínimo número de grifos y su localización para cumplir condiciones mínimas de cobertura tanto en cada manzana, cuenca, como a nivel global.

### 5.1 Preprocesamiento

En esta sección se indican los métodos y supuestos utilizados para la definición de los conjuntos y parámetros requeridos en los dos problemas señalados en el capítulo anterior.

Dado que ambos problemas presentan prácticamente los mismos parámetros, se presentarán a continuación todos ellos en conjunto, indicándose cuando alguno de ellos pertenezca a un solo problema.

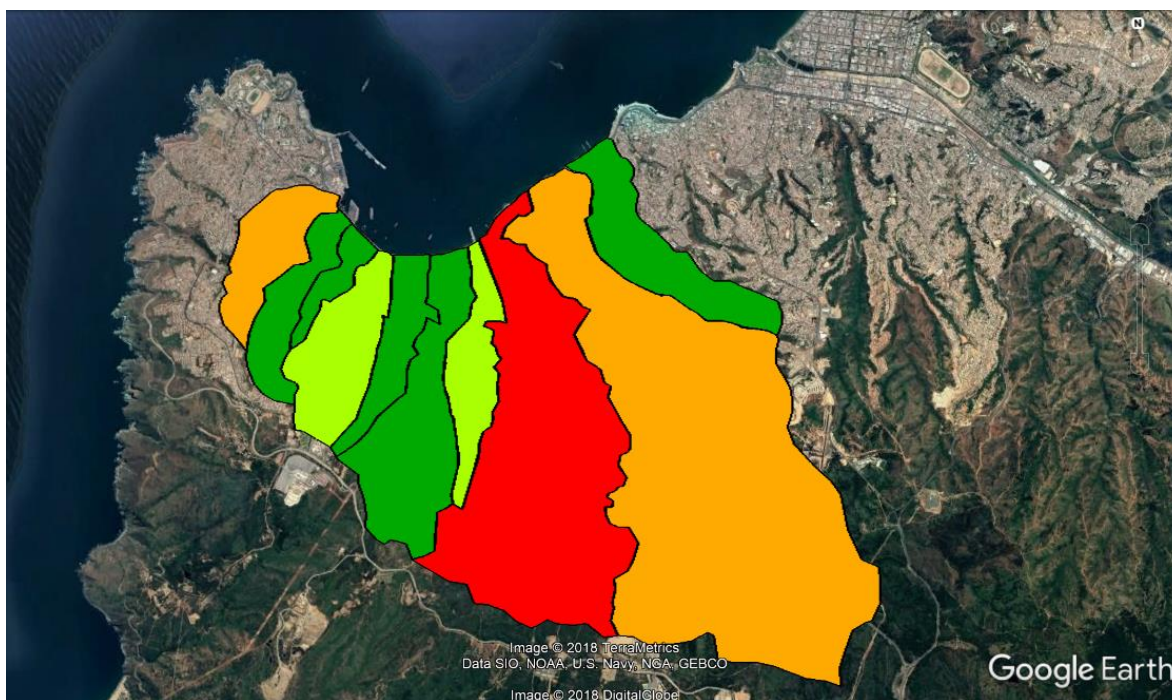
### 5.1.1 Conjuntos

#### Conjunto de cuencas:

Para la formación de este conjunto se utilizó el estudio Análisis de la Vulnerabilidad realizado por el señor Uriel Padilla, quien determinó mediante un análisis de varios factores las cuencas de la ciudad de Valparaíso y su vulnerabilidad ante potenciales incendios.

De lo anterior se determinó que Valparaíso podía ser dividido en 10 cuencas, cada una con una marcada vulnerabilidad al compararse con sus cuencas vecinas. Replicando las cuencas propuestas por Padilla (2011) se tiene la **Figura 5.1**.

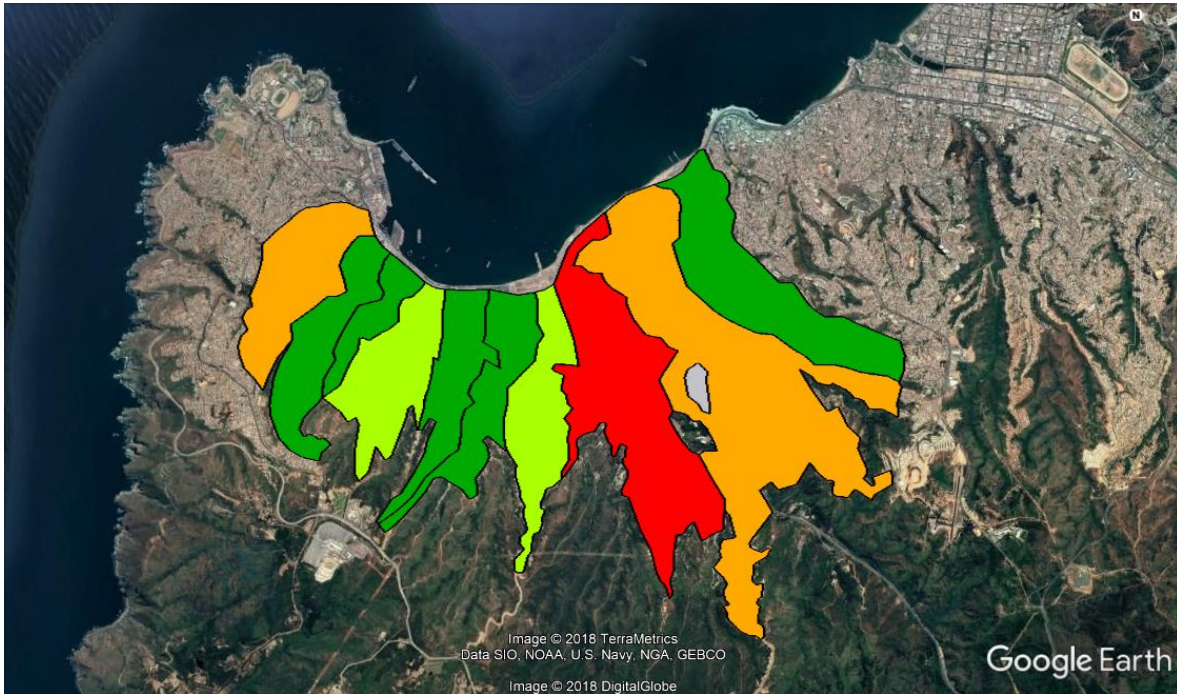
**Figura 5.1:** Replica de cuencas propuestas por Padilla (2011). Fuente: Elaboración propia.



Ahora, y dado que el estudio solo se concentra en las zonas urbanas de la ciudad de Valparaíso, se acotan las cuencas sugeridas por Padilla (2011) a sus intercepciones con los

límites urbanos de la ciudad de Valparaíso, quedando por resultados las 10 zonas presentadas en la **Figura 5.2** que conformarán el conjunto cuencas de los problemas analizados.

**Figura 5.2:** Conjunto de cuencas. Fuente: Elaboración propia.



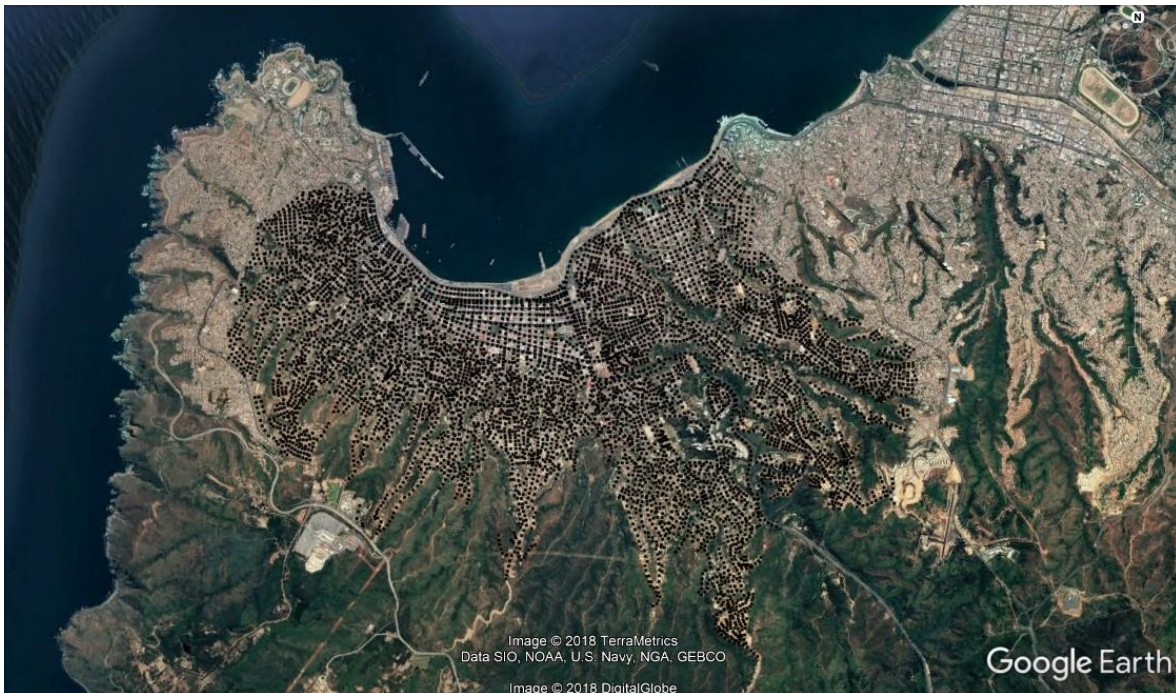
### **Conjunto de nodos oferta:**

Los nodos oferta son todos aquellos lugares donde es factible localizar un grifo. Para esto se consideró el reporte realizado en San Francisco para la implementación de su Sistema Auxiliar de Suministro de Agua, en donde indican que los lugares más favorables para localizar los grifos son las intercepciones de dos calles, ya que esto permite acceder con mayor facilidad a distintos puntos. Sin embargo, también recomiendan que para las zonas más vulnerables los grifos no debieran de superar los 60 – 70 metros unos de otros, por lo que en los casos donde dos esquinas estuviesen separadas por una distancia mayor a la indicada, se generaron tantos nodos potenciales a lo largo de la calle de modo de evitar la

existencia de una distancia superior a los 70 metros, dándole la posibilidad al modelo de localizar un grifo en dichos lugares si así lo encuentra necesario.

Es así como el conjunto de nodos potenciales queda representado en la **Figura 5.3**, con un nodo potencial en cada esquina, y otros a lo largo de las calles con el fin de que no exista una separación mayor a 70 metros entre dos grifos continuos. Se generaron un total de 6975 lugares potenciales.

**Figura 5.3:** Conjunto de nodos potenciales. Fuente: Elaboración propia.



### **Conjunto de nodos demanda:**

Para la formación del conjunto de nodos demanda también se utilizó como base lo realizado en San Francisco, en donde determinaron que un nodo demanda es toda cuadra de  $96 \text{ m}^2$ .

Debido a que en Valparaíso, y sobre todo en la parte alta de la ciudad, no existen cuadras bien definidas, es que se decidió cuadricular la ciudad en cuadrados de 96 metros de lado, cada uno representando una manzana ideal de la ciudad. Para esto se generó una malla cuadriculada como se aprecia en la **Figura 5.4**, y se creó un nodo demanda en cada vértice de los cuadrados que estuvieran dentro de los límites urbanos de las cuencas previamente definidas.

**Figura 5.4:** Malla cuadriculada para formación de manzanas. Fuente: Elaboración propia.



De esta forma se facilitó la generación de este conjunto y se siguió respetando lo realizado en el reporte de San Francisco. A continuación se presenta el resultado del conjunto de nodos demanda en la **Figura 5.5**.

**Figura 5.5:** Conjunto de nodos demanda. Fuente: Elaboración propia.



## 5.1.2 Parámetros

### **Demanda de caudal de la manzana $i$ , $h_i$ :**

Se toma lo realizado en el reporte de San Francisco, donde se indica: *“Se requiere que el sistema sea diseñado para que 15 mil galones de agua por minuto puedan ser concentrados en cualquier área de 100 mil pies cuadrados perteneciente a la zona crítica”*.

Por simplicidad se asume que  $h_i = h \forall i \in I$ . Realizando las conversiones de unidades queda  $h = 946 \left[ \frac{l}{s} \right]$  como la demanda total de cada manzana. Esta será la demanda total a satisfacer, pero solo se espera que sea cubierta por completo en las zonas más críticas, como se señala en el reporte de San Francisco.

**Área de la manzana i,  $AM_i$ :**

De lo indicado anteriormente, se desprende que una manzana i es cualquier área de 100 mil pies cuadrados. Es por esto que se asume que  $AM_i = AM \forall i \in I$ . Realizándose las conversiones de unidades quedan manzanas cuadradas con lados de 96 [m], es decir  $AM = 9290 [m^2]$ .

**Oferta de caudal del grifo potencial j,  $l_j$ :**

Se extrae del informe de San Francisco que las mangueras tendrán una presión efectiva en la boquilla de 75 psi con un diámetro interior de 2 pulgadas. Desde aquí se utilizan las fórmulas de caudal  $Q = A * v$ , y de presión dinámica  $P = \frac{1}{2} * \rho * v^2$ , con Q caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ , A área del conducto (manguera)  $[m^2]$ , v velocidad  $\left[\frac{m}{s}\right]$ , P presión [Pa] y  $\rho$  densidad del agua  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$ .

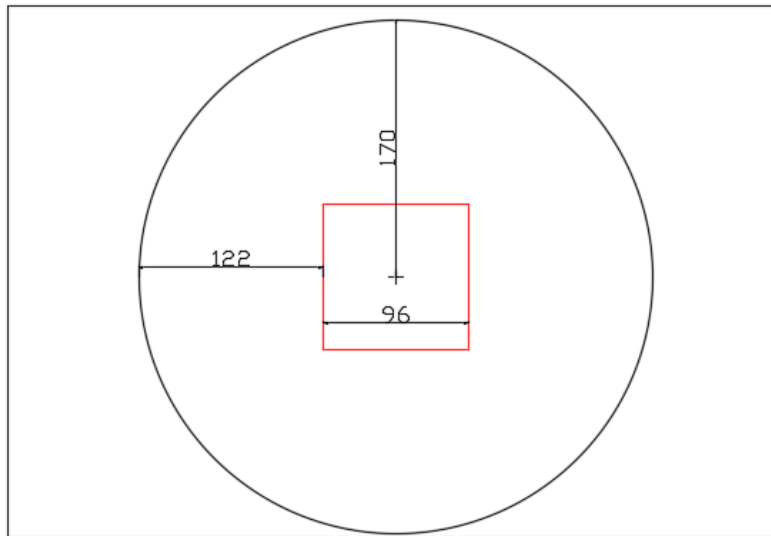
Realizando los cálculos y asumiendo que todo grifo poseerá dichas características se tiene que  $l_j = 1 \forall j \in J$ , con  $1 = 65 \left[\frac{l}{s}\right]$ .

**Radio de cobertura máximo, S:**

Hay dos consideraciones a tener en cuenta para el cálculo de este parámetro. Primero, al igual que en el reporte de San Francisco se asumen mangueras de 400 pies de largo, es decir, 122 metros. Segundo, dado que el radio de cobertura debe considerar a todo grifo que efectivamente pueda prestar servicios a una manzana, no solo se debe considerar la distancia desde el centro de esta, sino que también desde las aristas.

Considerando que para efectos del programa, el radio  $S$  se debe medir desde el centro de una manzana, es que se debe corregir esta distancia según lo previamente indicado. De esta forma como se aprecia en la **Figura 5.6** el radio de cobertura para efectos del modelo es  $S = 170$  [m], ya que cualquier punto dentro de una circunferencia con ese radio y centro en el nodo demanda, puede alcanzar algún punto de la manzana de lado 96 metros con una manguera de 122 metros.

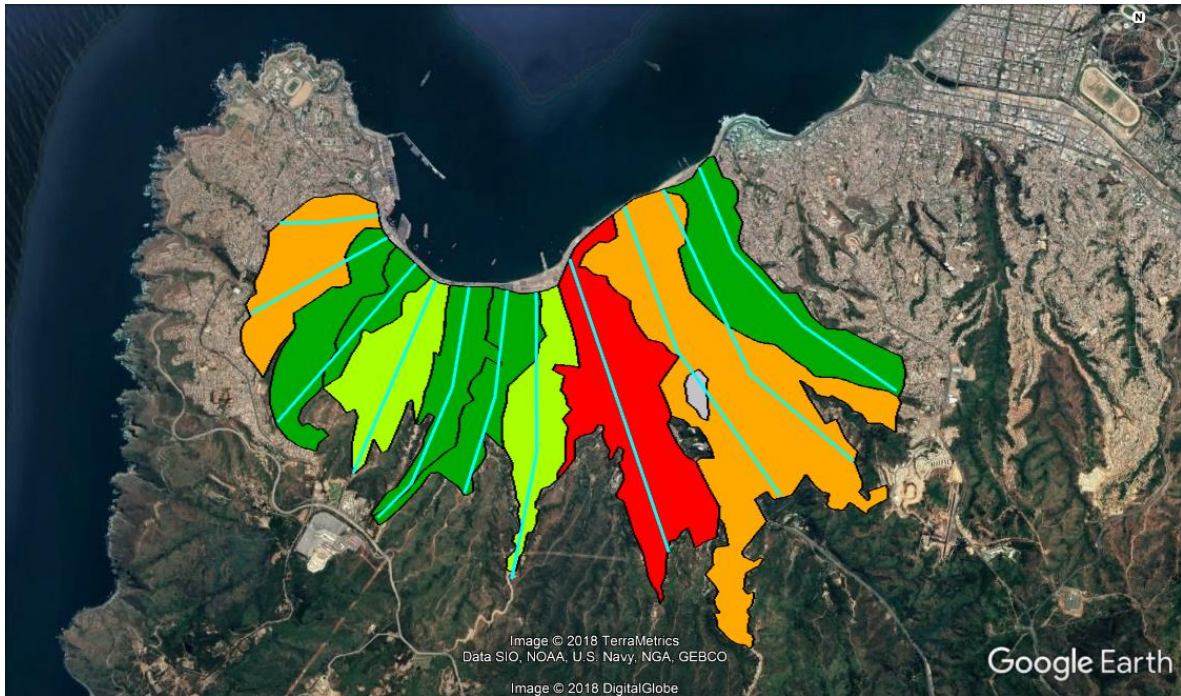
**Figura 5.6:** Radio de cobertura  $S$ . Fuente: Elaboración propia



#### **Ajuste radio de cobertura al plano bidimensional, $v_k$ :**

Para el cálculo de este parámetro se calcula el ángulo de elevación desde distintos puntos a lo largo de la costa hacia lo alto de los cerros como se aprecia en las líneas celestes de la **Figura 5.7**.

**Figura 5.7:** Perfiles de elevación. Fuente: Elaboración propia.



A partir de lo anterior se obtiene la siguiente **Tabla 5.1** con los valores para el parámetro  $v_k$  a partir de los ángulos calculados.

**Tabla 5.1:** Perfiles de elevación y parámetro ajuste radio de cobertura. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca	Angulo de elevación [-]	$v_k$ [-]
1	8,14	0,9899
2	8,14	0,9899
3	8,14	0,9899
4	8,14	0,9899
5	8,14	0,9899
6	6,02	0,9945
7	6,02	0,9945
8	3,72	0,9979
9	3,72	0,9979
10	3,72	0,9979

**Área cuenca  $k$ ,  $AC_k$ :**

Dado que cada manzana está representada por un cuadrado de lados 96 metros se desprende que cada manzana posee un área de 9216 metros cuadrados. Desde lo anterior se realiza el cálculo del área para cada cuenca como la cantidad de manzanas que están dentro de sus límites por el área de cada una de ellas. Los resultados se muestran en la **Tabla 5.2**.

**Tabla 5.2:** Área de las cuencas de Valparaíso. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca	$AC_k [m^2]$
1	1603584
2	1262592
3	516096
4	1511424
5	1059840
6	1253376
7	1345536
8	3326976
9	5446656
10	2267136

**Criticidad de la cuenca  $k$ ,  $z_k$  (sólo para P1):**

Continuando con el estudio realizado por Uriel (2011), se utilizan los resultados de vulnerabilidad mostrados en dicho estudio para el parámetro criticidad de cada cuenca, con  $z_k \in [0,1]$ , con 0 nula y 1 muy alta criticidad. Dichos resultados se presentan en la **Tabla 5.3**.

**Tabla 5.3:** Criticidad de las cuencas de Valparaíso. Fuente: (Padilla, 2011).

Cuenca	$z_k [-]$
1	0,295
2	0,220
3	0,189
4	0,262
5	0,210
6	0,206
7	0,245
8	0,469

<b>9</b>	0,325
<b>10</b>	0,176

**Fracción mínima obligatoria,  $\varphi_k$ :**

Del reporte de San Francisco se recoge que en el área protegida, y cuando no sea posible abastecer toda la demanda, al menos un 50% de ella debe ser cubierta. Es así como en un principio la fracción mínima obligatoria para la cuenca más crítica (cuenca 8) debiese ser de 0,5. Sin embargo, es necesario analizar si esto es factible en todos los puntos de dicha cuenca. Para realizar esto, se calculan cuantos grifos potenciales existen en el radio de cobertura de cada manzana de la cuenca 8, y se extrae el mínimo. Como resultado, se obtiene que el mínimo valor es de 5, es decir, una fracción de 0,4123 de su demanda.

De lo anterior, se utiliza como fracción mínima obligatoria para la cuenca 8 la fracción de 0,4123, y para las otras cuencas una ponderación simple según su vulnerabilidad. Los valores se presentan en la **Tabla 5.4**.

**Tabla 5.4:** Fracción mínima obligatoria para las cuencas de Valparaíso. Fuente: Elaboración propia.

<b>Cuenca</b>	<b><math>\varphi_k</math> [-]</b>
<b>1</b>	0,2593
<b>2</b>	0,1934
<b>3</b>	0,1661
<b>4</b>	0,2303
<b>5</b>	0,1846
<b>6</b>	0,1811
<b>7</b>	0,2154
<b>8</b>	0,4123
<b>9</b>	0,2857
<b>10</b>	0,1547

**Matriz de pertenencia,  $M_{ki}$ :**

Este parámetro es de elaboración propia, es decir, nace producto de la generación de los conjuntos K e I, en donde dado que ciertas manzanas están ubicadas en el límite de dos cuencas, se considera que una manzana i pertenece a una cuenca k si su centro está dentro de ella. Dada la alta cardinalidad de la matriz, los valores se resumen en la **Tabla 5.5**.

**Tabla 5.5:** Matriz de pertenencia. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca	Nodos i
<b>1</b>	1 a 174
<b>2</b>	175 a 311
<b>3</b>	312 a 367
<b>4</b>	368 a 531
<b>5</b>	532 a 646
<b>6</b>	647 a 782
<b>7</b>	783 a 928
<b>8</b>	929 a 1289
<b>9</b>	1290 a 1880
<b>10</b>	1881 a 2126

**Menor distancia entre nodo i y nodo j,  $d_{ij}$ :**

A modo de simplicidad se utiliza la distancia euclidiana para el cálculo de las distancias entre dos puntos considerando la longitud y latitud entregada por Google Earth. Se utiliza el siguiente código de Matlab para su cálculo.

**Figura 5.8:** Código Matlab para cálculo de parámetro  $d_{ij}$ . Fuente: Elaboración propia.

```

38 - I = xlsread('Data.xlsx','Nodos i','B2:C2127');
39 - J = xlsread('Data.xlsx','Nodos j','B2:C6976');
40 - for i=1:length(I)
41 -     xi=i;
42 -     for j=1:length(J)
43 -         yi=j;
44 -         x=I(i,1);
45 -         y=I(i,2);
46 -         xj=J(j,1);
47 -         yj=J(j,2);
48 -         dist=1000*6371*acos(cos(pi*(90-x)/180)*cos(pi*(90-xj)/180)+sin(pi*(90-x)/180)*sin(pi*(90-xj)/180)*cos(pi*(y-yj)/180));
49 -         dij(xi,yi)=dist;
50 -     end
51 - end

```

**Número máximo de grifos a instalar,  $p$  (sólo para P1)**

Se recoge del reporte CS-199 Planificación de Servicios de Soporte para el AWSS y del sitio web Virtual Museum of the City of San Francisco la siguiente información: Terminado el proyecto AWSS para San Francisco en 1913 se instalaron un total de 889 grifos para un área de 21 [km<sup>2</sup>], y para 1997 esta cantidad aumentó a 1550 grifos. Se tiene entonces que San Francisco pasó de una tasa de 42,3 a 73,8  $\left[\frac{\text{grifos}}{\text{km}^2}\right]$ .

A modo de replicar lo realizado en San Francisco para la ciudad de Valparaíso, y considerando un área de 20,4 [km<sup>2</sup>] se opta por sensibilizar el parámetro  $p$  en un rango igual a  $p = \{900, \dots, 1600\}$  con pasos de 50.

**Nivel mínimo de cobertura global exigida,  $\alpha$  (sólo para P2):**

Se extrae del reporte CS-199 Planificación de Servicios de Soporte para el AWSS, que como plan futuro para el sistema AWSS, se deben realizar las actividades necesarias para entregar un nivel de al menos un 90% a nivel global. Desde aquí se define el parámetro  $\alpha = 0,9$ .

**Nivel mínimo de cobertura en la cuenca  $k$  exigida,  $\beta_k$  (sólo para P2):**

Se extrae del reporte CS-199 Planificación de Servicios de Soporte para el AWSS, que como plan futuro para el sistema AWSS, se deben realizar las actividades necesarias para entregar un nivel de al menos un 50% de cobertura en cada una de las áreas FRA previamente definidas. Desde aquí, realizando un símil entre las áreas FRA de San Francisco y las cuencas de Valparaíso, se tiene que  $\beta_k = \beta \forall k \in K$  con  $\beta = 0,5$ .

## 5.2 Problema 1

En la siguiente sección se detallan los resultados del problema P1, tanto para el escenario con mínima cobertura como para el de sin ella. Por otro lado, y dada la linealidad del modelo, este fue resuelto mediante el programa AMPL con el Solver CPLEX 12.7.1.0, utilizando un mipdisplay de 4 y un timelimit de 10800 segundos.

### 5.2.1 Partida en caliente, problema P0

Previo a resolver el problema P1, es necesario ver su factibilidad para todas las iteraciones del parámetro  $p$  previamente definidas, esto dada la restricción de cobertura mínima obligatoria. Para esto se utiliza el siguiente modelo de minimización con el objetivo de determinar el mínimo valor de grifos que vuelven factible a P1, y conseguir así un punto de partida a las iteraciones a realizar sobre el parámetro  $p$ .

**Modelo Compacto:**

$$\begin{cases}
 \text{Min}_x \sum_{j \in J} X_j & (5.1) \\
 \text{s. t.} & \\
 \varphi_k * h_i \leq \sum_{j \in N_i^2} x_j * l_j \quad \forall k \in K, i \in N_k^1 & (5.2) \\
 X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J & (5.3)
 \end{cases}$$

Resuelto el modelo anterior, se obtuvo un tiempo computacional de 10816 segundos, es decir, utilizó el tiempo límite asignado, con un GAP de 1,25%. El resultado obtenido fue de 1033 grifos.

De esta forma queda definido el parámetro  $p$  como  $p = \{1050, \dots, 1600\}$  con pasos de 50, para ambos escenarios del problema P1.

### 5.2.2 Resultados con restricción de cobertura mínima

En la **Tabla 5.6** se muestran los resultados obtenidos para el problema P1 en su primer escenario, es decir, con restricción de cobertura mínima. Para cada iteración del parámetro  $p$  es posible ver el tiempo computacional (CPU\_time) en segundos, el resultado de la función objetivo (F.O.), la porción del área cubierta total en la ciudad (PACT), la porción del área cubierta local en cada cuenca (PAC\_k), y el GAP logrado.

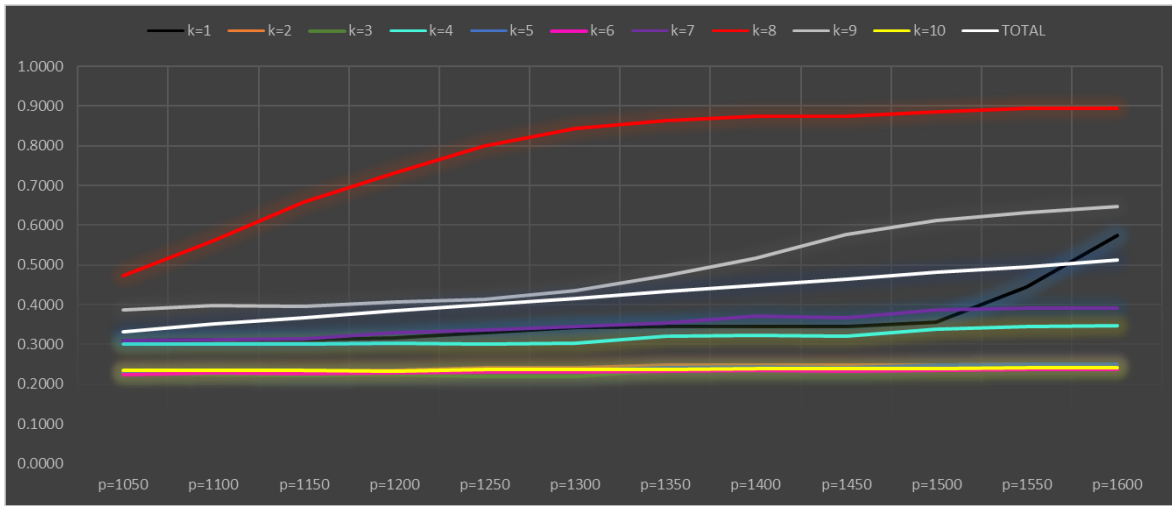
**Tabla 5.6:** Resultados iteraciones Problema 1 con restricción 2 activada. Fuente: Elaboración propia.

Resultados	p=1050	p=1100	p=1150	p=1200	p=1250	p=1300	p=1350	p=1400	p=1450	p=1500	p=1550	p=1600
<b>CPU_time</b>	11458.5	11484.2	11572.2	11885.0	1395.3	181.7	19.9	11.1	14.2	11.7	43.0	35.4
<b>F.O.</b>	213524	229720	244932	259471	272942	285275	296725	307381	317949	328348	338075	347630
<b>PACT [-]</b>	0.3325	0.3509	0.3668	0.3839	0.3999	0.4159	0.4328	0.4488	0.4646	0.4807	0.4961	0.5117
<b>PAC_k [-]</b>												
<i>k=1</i>	0.3092	0.3112	0.3112	0.3171	0.3289	0.3428	0.3455	0.3455	0.3455	0.3566	0.4435	0.5738
<i>k=2</i>	0.2277	0.2317	0.2317	0.2352	0.2402	0.2422	0.2473	0.2473	0.2473	0.2473	0.2503	0.2503
<i>k=3</i>	0.2282	0.2233	0.2209	0.2233	0.2196	0.2196	0.2344	0.2344	0.2344	0.2393	0.2405	0.2442
<i>k=4</i>	0.3004	0.3017	0.3012	0.3021	0.3017	0.3042	0.3209	0.3239	0.3209	0.3377	0.3440	0.3477
<i>k=5</i>	0.2312	0.2336	0.2276	0.2306	0.2336	0.2348	0.2414	0.2432	0.2414	0.2474	0.2503	0.2503
<i>k=6</i>	0.2243	0.2279	0.2268	0.2274	0.2294	0.2304	0.2334	0.2349	0.2334	0.2349	0.2364	0.2364
<i>k=7</i>	0.3087	0.3111	0.3144	0.3299	0.3356	0.3450	0.3544	0.3713	0.3676	0.3878	0.3920	0.3920
<i>k=8</i>	0.4730	0.5602	0.6572	0.7310	0.7998	0.8429	0.8627	0.8741	0.8754	0.8855	0.8941	0.8950
<i>k=9</i>	0.3880	0.3980	0.3966	0.4061	0.4132	0.4364	0.4730	0.5170	0.5758	0.6123	0.6309	0.6468
<i>k=10</i>	0.2343	0.2338	0.2341	0.2327	0.2371	0.2371	0.2366	0.2383	0.2383	0.2385	0.2422	0.2422
<b>GAP</b>	0.27%	0.08%	0.08%	0.03%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%

Es posible ver desde la **Tabla 5.6** que el modelo utilizó el tiempo límite para las primeras 4 iteraciones, sin embargo en todas ellas con un GAP bastante bajo. Luego, para las siguientes iteraciones, el GAP es prácticamente 0%, llegando a un óptimo global en un tiempo computacional menor al tiempo límite fijado.

A modo de apreciar con más claridad la relación entre nivel de cobertura y número de grifos esta la **Figura 5.9**. El nivel de cobertura se encuentra en el eje vertical mientras que la cantidad  $p$  de grifos en el eje horizontal.

**Figura 5.9:** Fracción de área cubierta local y global para Problema 1 con Restricción 2 activada. Fuente: Elaboración propia.



Se aprecia que para la primera iteración, el nivel de cobertura se acerca al mínimo obligatorio exigido por la restricción 2 del problema P1, esto ya que el parámetro  $p = 1050$  es cercano al calculado anteriormente (partida en caliente), es decir, apenas permite cumplir con la restricción señalada. Para las siguientes iteraciones de  $p$  se advierte que solo en la cuenca 8 hay un aumento en el nivel de cobertura, mientras que en las otras cuencas este valor se mantiene relativamente constante, el motivo radica en que la cuenca 8 es la que presenta mayor vulnerabilidad, y por ende instalar un nuevo grifo en dicha zona tiene un mayor impacto en la función objetivo. Lo anterior ocurre hasta la iteración  $p=1300$ , en donde las cuencas 1, 7 y 9 comienzan a presentar aumentos, mientras que la cobertura en la cuenca 8 comienza a sufrir una disminución en su pendiente, esto puede deberse a dos motivos:

- Dada la topografía de la ciudad, existen ciertas manzanas dentro de las cuencas que no tienen suficiente oferta de grifos potenciales para cubrir toda su demanda, de esta forma, aun instalando todos los grifos dentro de su radio de cobertura, su demanda no será satisfecha en su totalidad. Esto provocaría que la cuenca 8

presente un límite máximo de cobertura por debajo del 100%, por tanto en cierto punto el modelo no tendría la opción de instalar más grifos en dicha zona, y optaría por otras cuencas.

- Dado que para las primeras iteraciones, y luego de cumplir la restricción de cobertura mínima, el modelo tiende a entregar toda su oferta  $p$  de grifos a la cuenca 8 como consecuencia de su criticidad, esta logra alcanzar rápidamente un nivel cercano al 85% de cobertura. Para dicho instante es de esperarse que cada manzana dentro de la cuenca presente un nivel alto de cobertura dentro de sus posibilidades, y por ende, instalar un nuevo grifo no tendría el mismo impacto que, por ejemplo, instalar en una cuenca de menor criticidad, pero con mayor demanda restante por satisfacer.

### 5.2.3 Resultados sin restricción de cobertura mínima

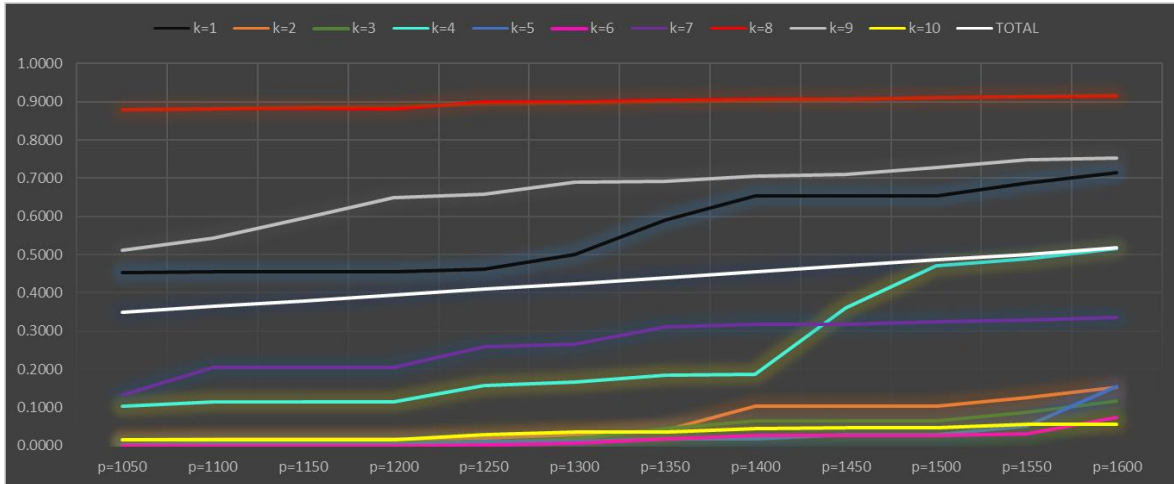
Para este escenario se omite la restricción de cobertura mínima del problema P1, con el objetivo de ver cómo se comporta el modelo al no restringirlo a entregar un nivel de servicio determinado en cada manzana. Cabe señalar que si bien para este escenario no era necesario realizar una partida en caliente debido a la omisión de la restricción 2, aun así se consideraron las mismas iteraciones del parámetro  $p$  para que ambas situaciones sean comparables.

Al igual que para el escenario anterior, se muestra a continuación en la **Tabla 5.7** el detalle de los resultados y luego en la **Figura 5.10** la variación en el nivel de cobertura local y global para cada iteración de  $p$ .

**Tabla 5.7:** Resultados iteraciones Problema 1 con restricción 2 desactivada. Fuente: Elaboración propia.

Resultados	p=1050	p=1100	p=1150	p=1200	p=1250	p=1300	p=1350	p=1400	p=1450	p=1500	p=1550	p=1600
<b>CPU_time</b>	5.3	5.9	1.3	13.4	10.3	15.4	14.7	21.3	35.1	25.9	26.1	31.3
<b>F.O.</b>	265558	275080	284594	294086	303407	312439	321131	329730	338248	346740	355121	363297
<b>PACT [-]</b>	0.3485	0.3646	0.3790	0.3936	0.4092	0.4243	0.4397	0.4556	0.4714	0.4860	0.5009	0.5179
<b>PAC_k [-]</b>												
<i>k=1</i>	0.4529	0.4545	0.4545	0.4545	0.4616	0.5002	0.5906	0.6526	0.6526	0.6526	0.6869	0.7133
<i>k=2</i>	0.0145	0.0186	0.0186	0.0186	0.0196	0.0301	0.0401	0.1028	0.1028	0.1028	0.1259	0.1525
<i>k=3</i>	0.0012	0.0086	0.0086	0.0086	0.0086	0.0172	0.0454	0.0650	0.0650	0.0650	0.0871	0.1166
<i>k=4</i>	0.1039	0.1148	0.1148	0.1148	0.1571	0.1676	0.1835	0.1877	0.3611	0.4701	0.4898	0.5149
<i>k=5</i>	0.0018	0.0042	0.0042	0.0042	0.0108	0.0119	0.0173	0.0173	0.0293	0.0293	0.0514	0.1553
<i>k=6</i>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0030	0.0076	0.0177	0.0263	0.0263	0.0273	0.0313	0.0743
<i>k=7</i>	0.1318	0.2052	0.2052	0.2052	0.2593	0.2659	0.3101	0.3167	0.3172	0.3238	0.3290	0.3353
<i>k=8</i>	0.8798	0.8812	0.8828	0.8817	0.8984	0.8998	0.9047	0.9055	0.9070	0.9095	0.9132	0.9146
<i>k=9</i>	0.5109	0.5442	0.5951	0.6483	0.6591	0.6891	0.6914	0.7054	0.7102	0.7287	0.7471	0.7516
<i>k=10</i>	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	0.0296	0.0369	0.0369	0.0441	0.0461	0.0472	0.0550	0.0561
<b>GAP</b>	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%

**Figura 5.10:** Fracción de área cubierta local y global para Problema 1 con Restricción 2 desactivada. Fuente: Elaboración propia.



Se observa que en ninguna de las iteraciones se requirió del tiempo límite fijado, por ende, en todas las iteraciones fue posible encontrar la solución óptima global con un GAP prácticamente del 0%.

Mediante la **Figura 5.10**, se distingue que el modelo desde un principio localiza la mayor parte de los grifos en la cuenca 8, esto en desmedro de las cuencas menos vulnerables como

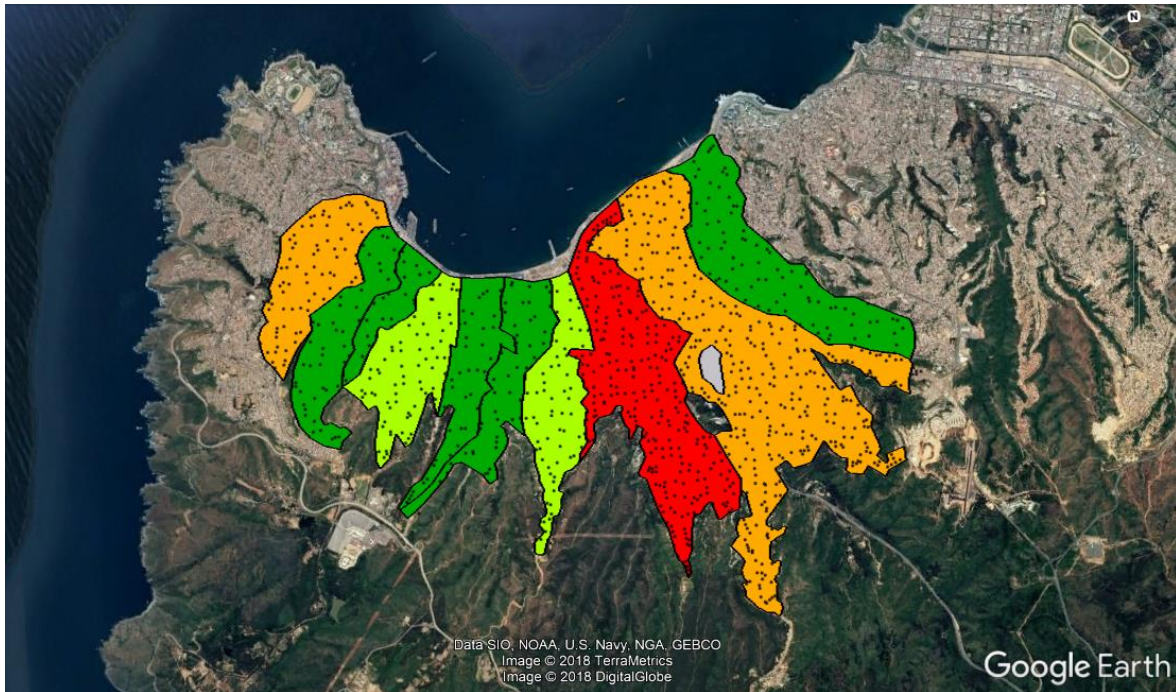
lo son la 2, 3, 5, 6 y 10. A medida que se aumenta el valor del parámetro  $p$  se tienden a localizar más grifos en las cuencas 1, 4, 7 y 9, ya que son estas las de mayor vulnerabilidad detrás de la cuenca 8, que para ese instante, y como se explicó ya anteriormente, presenta todas sus manzanas con niveles de cobertura cercanos a sus máximos.

#### **5.2.4 Dinámica de los modelos**

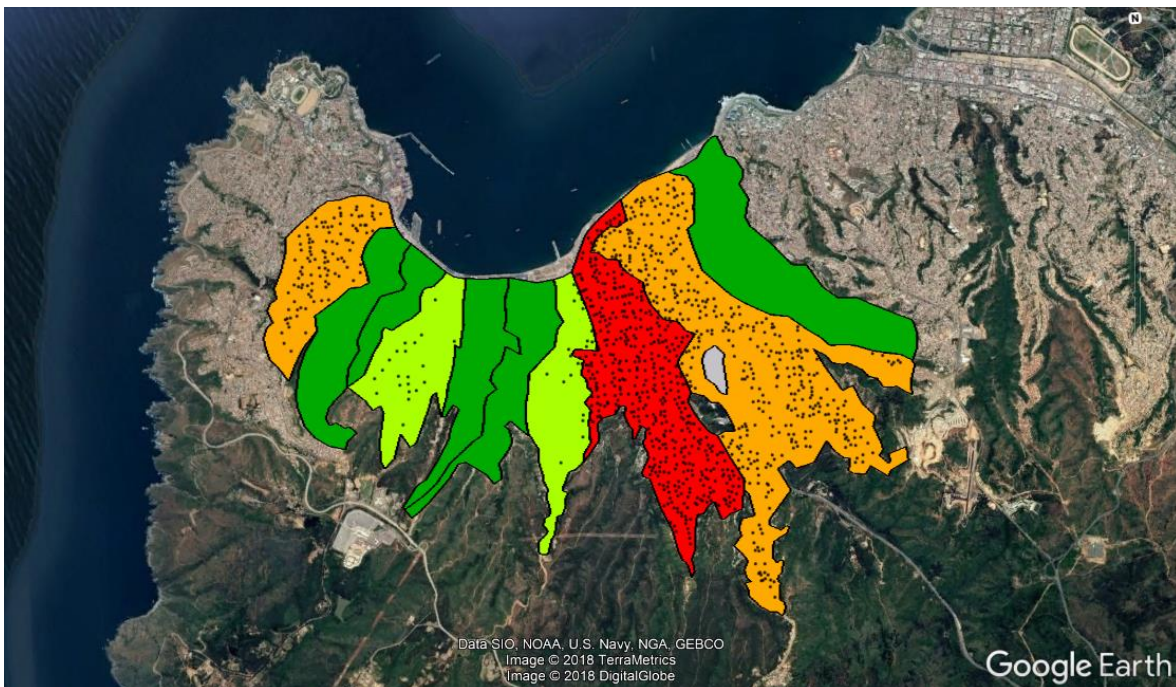
Con propósitos de exponer más claramente como se ve afectado el resultado del experimento producto tanto de la variación del parámetro  $p$  como en la utilización o no de una cobertura mínima obligatoria, se presentan a continuación 4 casos representativos de las iteraciones anteriormente expuestas, siendo estas las iteraciones  $p=1050$  y  $p=1600$  de ambos escenarios, es decir, del problema con restricción de cobertura mínima y del problema sin ella.

En primer lugar, se observa en la **Figura 5.11** y **Figura 5.12** la iteración  $p = 1050$  del caso con y sin restricción de cobertura mínima respectivamente. Es posible notar que en la primera figura existe una distribución más homogénea de grifos a lo largo y ancho de todas las cuencas de la ciudad, mientras que en la segunda figura estos se tienden a acumular más en las cuencas de color rojo y naranja (vulnerabilidad alta y media), para luego localizar solo ciertos grifos en las cuencas verde claro (vulnerabilidad baja) y finalmente ninguno en las verde oscuro (vulnerabilidad muy baja).

**Figura 5.11:** Grifos asignados para iteración  $p = 1050$  con Restricción 2 activada. Fuente: Elaboración propia.



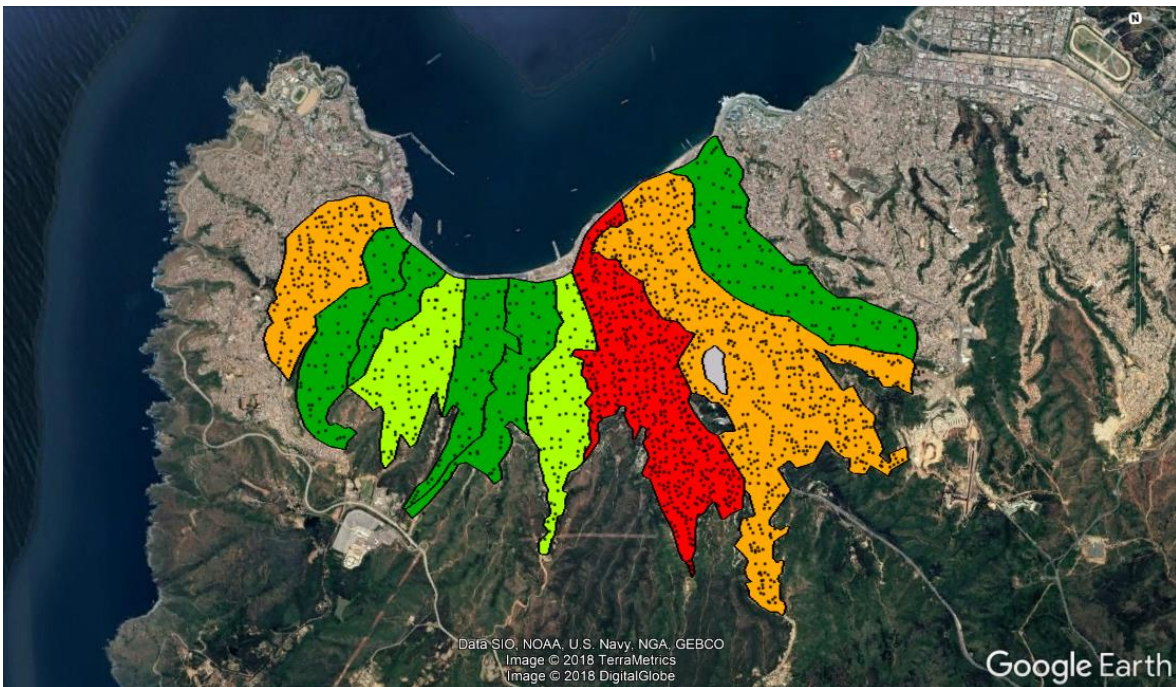
**Figura 5.12:** Grifos asignados para iteración  $p = 1050$  con Restricción 2 desactivada. Fuente: Elaboración propia.



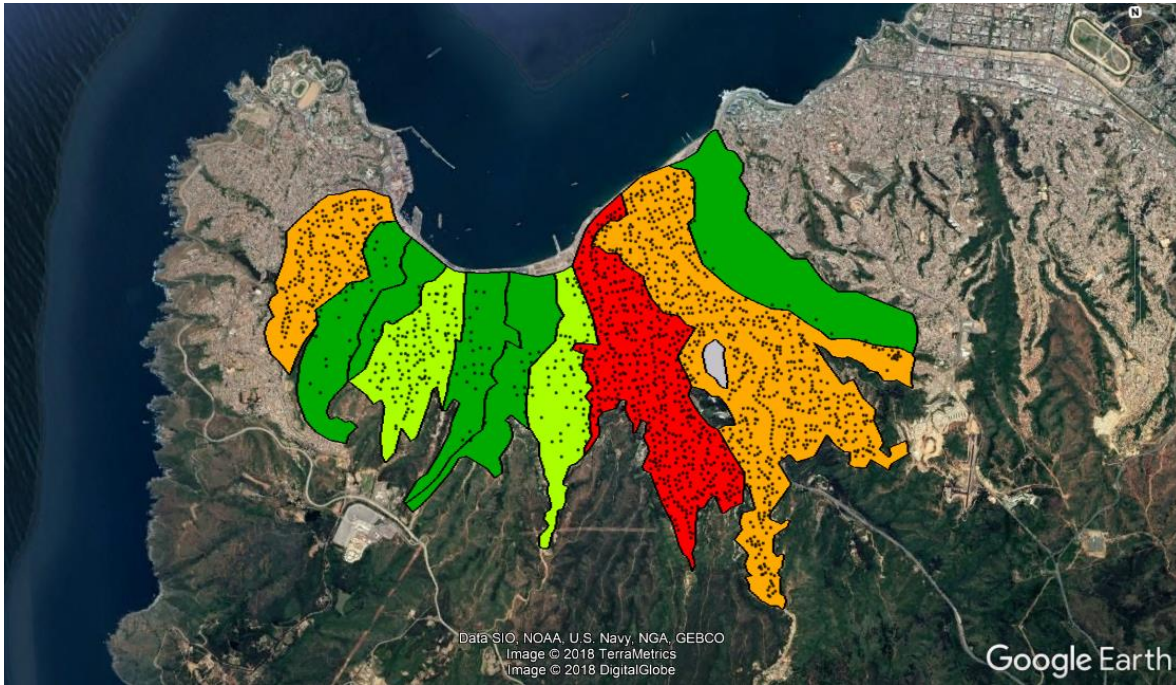
Es así como ambas situaciones presentan una ventaja sobre la otra, mientras que el resultado con restricción de mínima cobertura garantiza un mayor nivel de servicio a nivel local en cada una de las cuencas, el resultado sin dicha restricción presenta un valor mayor en su función objetivo y logra una mayor cobertura a nivel global.

En segundo lugar, se presentan la **Figura 5.13** y **Figura 5.14** para la iteración de  $p = 1600$  de los problemas con y sin restricción de cobertura mínima respectivamente. Se observa aquí que su diferencia es la misma que para el caso anteriormente descrito, pero ahora, y dado que se tiene la posibilidad de localizar una mayor cantidad de grifos, incluso para el problema sin restricción de cobertura mínima se logran instalar ciertos grifos en las cuencas con vulnerabilidad muy baja.

**Figura 5.13:** Grifos asignados para iteración  $p = 1600$  con Restricción 2 activada. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.14:** Grifos asignados para iteración  $p = 1600$  con Restricción 2 desactivada.  
Fuente: Elaboración propia.



### 5.3 Problema 2

En esta sección se detallan los resultados del problema P2. Al igual que en la sección anterior, se utilizó el programa AMPL con el Solver CPLEX 12.7.1.0, con un mipdisplay de 4 y un timelimit de 10800 segundos.

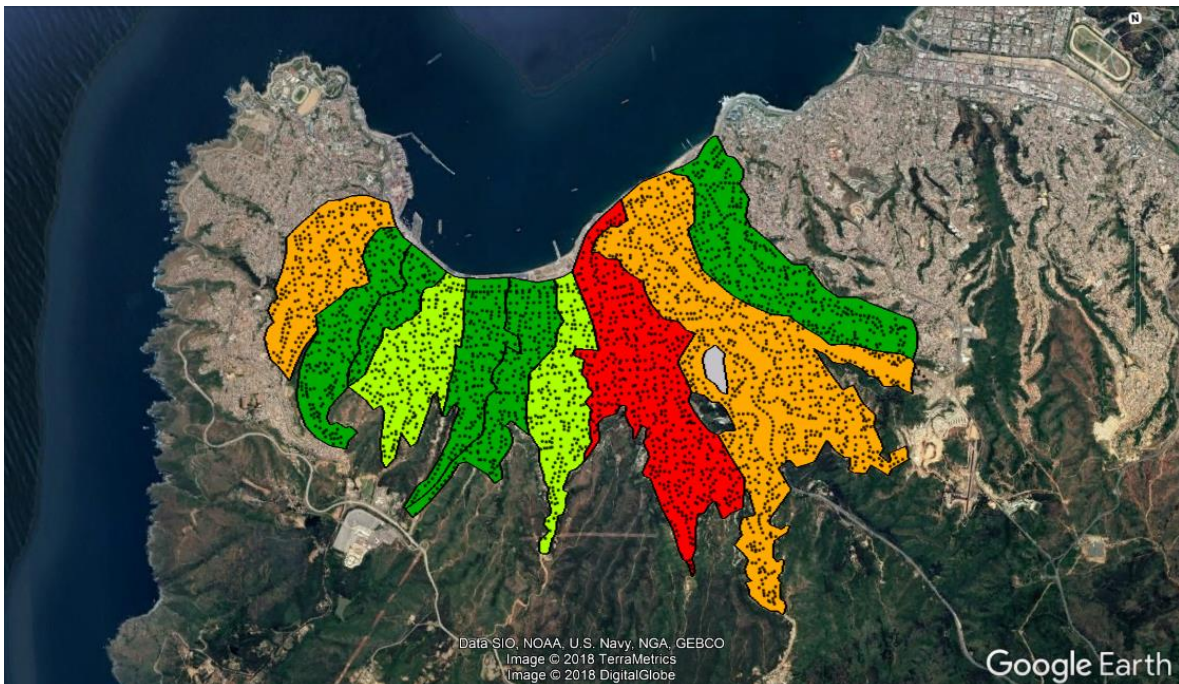
El problema P2 requirió de un tiempo computacional de 254 segundos logrando un GAP de un 0,03%. La función objetivo indicó un resultado de 2956, es decir, es este el mínimo número de grifos que se requerirían para entregar una cobertura global del 90%. Además es posible observar que la cobertura local en cada cuenca no solo se logró, sino que se sobrepasó en gran magnitud, siendo esto un indicador del alto peso que tiene cada cuenca sobre el nivel global en términos de cobertura. Los detalles de los resultados se muestran en la **Tabla 5.8**. Por otro lado, se presenta también la **Figura 5.15** con la localización de los grifos a lo largo

y ancho de las 10 cuencas. Se observa que cada una de las cuencas presenta un alto número de grifos localizados, esto en función de cumplir con el 90% de cobertura a nivel global.

**Tabla 5.8:** Resultados Problema 2. Fuente: Elaboración propia.

Resultados	
<b>CPU_time [seg]</b>	253.9
<b>F.O. (p)</b>	2956
<b>PACT [-]</b>	0.9000
<b>PAC_k [-]</b>	
<i>k=1</i>	0.8779
<i>k=2</i>	0.9214
<i>k=3</i>	0.9555
<i>k=4</i>	0.9233
<i>k=5</i>	0.9160
<i>k=6</i>	0.8865
<i>k=7</i>	0.9074
<i>k=8</i>	0.9152
<i>k=9</i>	0.8763
<i>k=10</i>	0.9061
<b>GAP</b>	0.03%

**Figura 5.15:** Grifos asignados para Problema 2. Fuente: Elaboración propia.



---

## 6 Conclusiones

En este trabajo fueron estudiadas las principales características y falencias del actual sistema de grifos con el que cuenta la ciudad de Valparaíso, y se realizaron propuestas para la implementación de una red auxiliar e independiente a la de agua potable. Los parámetros utilizados para la formulación de las propuestas fueron rescatados de escenarios reales, donde ya se han implementado esta clase de redes con resultados exitosos, como lo es el caso de San Francisco. Todo lo anterior fue llevado a cabo mediante el uso y modificación de los modelos de localización LSCP, MCLP y MCLP con cobertura obligatoria.

En primer lugar, es posible indicar mediante este trabajo, que la actual red de grifos aun cumpliendo con todas las normas que la regulan, no satisface los estándares internacionales marcados por San Francisco. Así por ejemplo, y según indica la norma, una red de grifos de caudal 16 litros por segundo y para una manzana común y corriente con un único grifo a 150 metros de distancia, logra entregar un 1% del caudal requerido según el sistema de San Francisco, esto no considerando problemas por pérdida de presión. De esta forma, no solo es importante mejorar la baja presión que actualmente presenta la red, si no que entregar una cobertura que permita responder de forma eficiente en cada localidad de la ciudad.

Se desprende de lo anterior, que el diseño y operación de una red de agua potable debe estar diferenciada de la de una red contra incendios, de modo de evitar que los intereses por maximizar utilidades de las empresas distribuidoras, hoy en día a cargo de las redes de agua potable, no interfieran con las necesidades de la población. De este modo se abre paso a que este tipo de problemas se comiencen a analizar desde una perspectiva de maximización de cobertura en lugar de maximización de utilidades.

En función de lo anterior, fue desarrollado un modelo de máxima cobertura (P1) que dado un número máximo de grifos, indique la mejor combinación de lugares para localizarlos, de modo de maximizar el nivel de demanda cubierta considerando la vulnerabilidad de cada zona como un factor multiplicativo de su demanda. Es importante señalar que P1 fue analizado desde dos escenarios, uno exigiendo un nivel mínimo de cobertura para cada manzana según la criticidad de la cuenca, y otro liberándolo a localizar sin restricciones mínimas.

Las grandes diferencias observadas entre ambos escenarios tienen relación a los niveles de cobertura entregados por cada uno de estos, a nivel ciudad y a nivel cuenca. De esta forma, no restringir al modelo a una mínima cobertura, es decir, utilizar como base al modelo MCLP, permite encontrar aquellos lugares potenciales que maximicen el nivel de cobertura global entregado a la ciudad, sin embargo no garantiza que cada cuenca reciba un nivel de servicio mínimo. Por el contrario, el escenario con mínima cobertura exigida, es decir, utilizando como base al modelo MCLP con cobertura obligatoria, sufre una disminución en el nivel de cobertura global en comparación al escenario anterior, no obstante, cada cuenca recibe un nivel de servicio acorde a su vulnerabilidad, lo que permitiría enfrentar una catástrofe en cada sector de la ciudad, y no solo en las zonas más críticas.

Por otro lado también fue analizada la variación de la cobertura en función del número de grifos instalados, obteniéndose como resultado un aumento promedio de 4 puntos porcentuales para la cobertura global, por cada 50 grifos extras instalados en la ciudad. Para las primeras iteraciones estos aumentos en la cobertura global se adjudican prácticamente solo a incrementos en la cuenca número 8, ya que es la más crítica dentro de las analizadas, percibiendo aumentos de hasta 18 puntos porcentuales para las primeras iteraciones, sin

embargo, cuando esta alcanzó su límite máximo, otras cuencas comenzaron a experimentar dicho aumento.

Considerando que las primeras iteraciones realizadas fueron representando la situación inicial de San Francisco en el año 1908, con 1050 grifos instalados y un 33% de cobertura total, se cree que este resultado no respondería aun de manera satisfactoria a las necesidades de la ciudad, ya que las cuencas más críticas como lo son la 1, 8 y 9 presentan entre un 30-47% de cobertura total, es decir, no se podría satisfacer ni la mitad de la demanda en las zonas más vulnerables. Para la última iteración analizada, replicando el caso de San Francisco para principios del año 2000, se obtuvo una cobertura global de un 51% con 1600 grifos instalados, logrando entre un 57-89% de cobertura en las cuencas anteriormente señaladas, lo que se acerca más a lo que la ciudad requiere hoy en día.

Pese al positivo resultado para la última iteración analizada, ciudades como San Francisco se encuentran permanentemente mejorando sus servicios públicos. Para el caso de su sistema auxiliar de grifos, han continuado invirtiendo de manera de mejorar su tasa de respuesta. En consecuencia, también se analizó en este trabajo la posibilidad de que, de instalarse un sistema auxiliar para combatir incendios, en un futuro también sean considerados para esta red los objetivos que hoy en día San Francisco trabaja por incorporar. De esta forma, fue desarrollado un problema de minimización (P2) que determine el menor número de grifos que cumpla con los objetivos impuestos por San Francisco, siendo estos lograr un 90% de cobertura a nivel global y un 50% a nivel local en cada cuenca, para lo cual se utilizó como base el modelo LSCP. Como resultado de P2, Valparaíso necesitaría instalar 2956 grifos para alcanzar dicha cobertura, cifra que San Francisco pretende lograr en los próximos años. Para dicho resultado, cada cuenca presentaría entre un 87 y un 96% de cobertura, números que

ciertamente permitirían a la ciudad combatir de manera eficiente todas las catástrofes que últimamente la aquejan.

Cabe señalar, que de instalarse la solución obtenida en P2 a partir de un escenario donde la última iteración de P1 (para el escenario con nivel mínimo de cobertura exigido) ya se encontrara instalada, solo se necesitaría un 51% de los 2956 grifos requeridos, dado que ambas soluciones presentan resultados similares. Esto facilitaría un escenario donde la ciudad de Valparaíso decida comenzar por una solución más mesurada, con el fin de probar como se ajustaría esta propuesta a las condiciones reales de la ciudad, y luego expandir su sistema tal y como San Francisco se encuentra realizando.

---

## Referencias

- 24 Horas. (31 de Agosto de 2016). *Incendio destruye dos viviendas en cerro Playa Ancha de Valparaíso*. Obtenido de <http://www.24horas.cl/nacional/incendio-destruye-dos-viviendas-en-cerro-playa-ancha-de-valparaiso-2120156>
- AECOM/AGS JV. (2014). *CS-199 Planning Support Services for Auxiliary Water Supply System (AWSS)*. San Francisco.
- Chahuán, F., Horvath, A., Lagos, R., Letelier, J. P., Moreiray, I., & Zaldívar, A. (2014). INFORME de la Comisión Especial sobre Catástrofe por Incendio en Valparaíso., (pág. 84). Valparaíso.
- Church, R., & Revelle, C. (1974). *The Maximal Covering Location Problem*. Papers in regional science, 32(1), 101-118.
- City and Country of San Francisco . (s.f.). *Fire Department*. Obtenido de <http://sf-fire.org/water-supply-systems>
- El Mercurio. (23 de Enero de 2001). *Urge modernizar sistema de grifos en los cerros*. Obtenido de <http://www.mercuriovalpo.cl/site/edic/20010122202908/pags/20010123005006.html>
- Emol. (9 de Octubre de 2015). *Incendio en Valparaíso: Alcalde admite que red de grifos aún es deficiente*. Obtenido de <http://www.emol.com/noticias/Nacional/2015/10/09/753697/Incendio-en-Valparaiso-Alcalde-admite-que-red-de-grifos-aun-es-deficiente.html>
- ESVAL. (s.f.). *Alcalde Jorge Sharp y Esval invitan a apadrinar un grifo en Valparaíso*. Obtenido de <http://portal.esval.cl/alcalde-jorge-sharp-y-esval-invitan-a-apadrinar-un-grifo-en-valparaiso/>
- ESVAL. (s.f.). *Preguntas Frecuentes*. Obtenido de <http://portal.esval.cl/preguntas-frecuentes/>
- Gobierno de Chile. (2014). *Plan de Inversión, Reconstrucción y Rehabilitación Urbana*. Valparaíso .
- Manson, M., Connick, H., & Ransom, T. (1908). *Auxiliary Water Supply System for Fire Protection for San Francisco*. San Francisco, California: Britton & Rey.
- NCh1646:2004 (31 de Mayo de 2004).
- NCh691:2015 (19 de Mayo de 2015).
- Padilla, U. (2011). *Análisis de la Vulnerabilidad por Remoción en Masa e Inundación. Caso Estudio: Cuencas de la Ciudad de Valparaíso*. Santiago.

- 
- Reconstrucción Valparaíso . (2014). *Reconstrucción y Rehabilitación urbana*. Valparaíso.
- SISS. (8 de Abril de 1993). Ordenanza N° 366. *Grifos Intradomiciliarios* . Santiago, Chile.
- SoyValparaíso. (9 de Septiembre de 2015). *Gobernación pidió investigación por problemas de presión de agua al momento del incendio en Valparaíso*. Obtenido de <http://www.soychile.cl/Valparaiso/Sociedad/2015/10/09/350992/Gobernacion-pidio-investigacion-por-problemas-de-presion-de-agua-al-momento-del-incendio.aspx>
- Tele13. (13 de Marzo de 2015). *Los grandes incendios que han afectado a Valparaíso en el último siglo*. Obtenido de <http://www.t13.cl/noticia/actualidad/nacional/los-grandes-incendios-que-han-afectado-a-valparaiso>
- Toregas, C. (1970). *A Covering Formulation for the Location of Public Service Facilities*. M.S. thesis, Cornell University.
- Van Dyke, S. (s.f.). *San Francisco Fire Department Water Supply System*. Obtenido de <http://www.sfmuseum.org/quake/awss2.html>
- Wikipedia. (1 de Diciembre de 2017). *San Francisco*. Obtenido de [https://en.wikipedia.org/wiki/San\\_Francisco](https://en.wikipedia.org/wiki/San_Francisco)