



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

**CREACIÓN DE UN INDICADOR DE RESILIENCIA PARA EVALUAR LA
ADAPTACIÓN DE LA RED DE AGUA DE UNA CIUDAD A LOS EFECTOS
DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

SCARLET DENNISSE TAIBA GUERRERO

PROFESOR GUÍA:
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
J. CRISTIAN SALGADO HERRERA
GUILLERMO VALENZUELA VENEGAS
JAVIERA RIFFO RIVAS

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA
POR: **SCARLET DENNISSE TAIBA GUERRERO**
FECHA: 2020
PROF. GUÍA: FELIPE DÍAZ ALVARADO

CREACIÓN DE UN INDICADOR DE RESILIENCIA PARA EVALUAR LA ADAPTACIÓN DE LA RED DE AGUA DE UNA CIUDAD A LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La crisis mundial del cambio climático está directamente relacionada con la disponibilidad de los recursos hídricos. El aumento de la variabilidad del ciclo hidrológico es uno de los principales efectos del cambio climático, por lo que, asegurar que todos tengan acceso a servicios de abastecimiento de agua y saneamiento resilientes y sostenibles es una estrategia crítica de mitigación al cambio climático.

Ante la necesidad de adoptar un enfoque integral del cambio climático y la gestión de los recursos hídricos, surge la necesidad de contar con indicadores que permitan evaluar estos efectos. Es por esto que en el presente trabajo de título se busca crear un indicador de resiliencia para evaluar la adaptación del sistema hídrico de una ciudad a los efectos del cambio climático, entendiendo resiliencia como la capacidad de la configuración de un sistema de soportar y absorber un determinado evento disruptivo y mantener su funcionalidad usando rutas alternativas. Luego de un análisis de los efectos del cambio climático, se selecciona a los episodios de precipitación extrema como el evento disruptivo a evaluar y se introduce el parámetro de vulnerabilidad para cuantificar sus efectos en la red.

El índice de resiliencia propuesto estará compuesto por dos subíndices: el primero corresponde a un subíndice de funcionalidad que busca evaluar el nivel de servicio entregado por la red hídrica ante la ocurrencia de un evento disruptivo, y el segundo que corresponde a un subíndice de vulnerabilidad topológica, el que busca evaluar la dependencia de los nodos de consumo de fuentes vulnerables y no vulnerables a través de las conexiones de la red.

Se implementa este indicador en el caso de estudio de la red hídrica del Gran Santiago, de la cual se cuenta con dos configuraciones: una representación de la red actual, y una representación de la red optimizada, obtenida como resultado del Proyecto Fondecyt “*Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation*”. A partir de estas, se obtiene que la red optimizada alcanza una resiliencia de 87% y la red actual un 71%, por lo tanto, la red optimizada aseguraría un servicio de abastecimiento de agua más resiliente que el actual.

Finalmente, se concluye que es posible implementar el índice de resiliencia en problemas de optimización lineal, utilizando métodos de linealización. Por otro lado, el índice de resiliencia depende directamente del parámetro de vulnerabilidad que se asigna a ciertos nodos de la red, en base a los efectos del cambio climático. Por lo anterior, se propone realizar un estudio detallado de estos efectos, a fin de evitar la incertidumbre de los modelos climáticos globales y asegurar una correcta asignación de la vulnerabilidad, evitando en consecuencia una subestimación o sobrestimación de la resiliencia del sistema.

*A mis sobrinos,
mi Máximo y mi Trini.*

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi comisión, en especial a mi profesor guía Felipe, por su apoyo constante y comprensión a lo largo de este proceso de desarrollo de la memoria. También quiero agradecer a todos los integrantes del Proyecto por su ayuda y valioso aporte en este trabajo.

A mi mamá, a mi papá, y a mis hermanas, les agradezco por siempre creer en mí y ayudarme a lograr esta meta, su apoyo fue fundamental en este camino.

A ti Alonso te agradezco por siempre estar ahí, por motivarme a lograr mis metas y ser el mejor compañero de vida.

A mis amigas de siempre, gracias por estar siempre en mi vida a pesar de la distancia, son las mejores.

Y finalmente quiero agradecer a todos aquellos que han formado parte de mi vida universitaria, por los aprendizajes, por los buenos momentos, y por todo lo que me ha llevado a terminar esta etapa.

Infinitas gracias.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos y Alcances	2
1.1.1. Objetivos	2
1.1.2. Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1. Antecedentes generales	3
2.2. Resiliencia	5
2.2.1. Definiciones de resiliencia	6
2.2.2. Índices de resiliencia	10
2.2.3. Análisis de la revisión bibliográfica	15
2.3. Efectos del cambio climático en redes hídricas	16
2.3.1. Vulnerabilidad de una red hídrica	18
2.3.2. Análisis de los efectos del cambio climático y resiliencia en una red hídrica	20
3. Metodología	22
3.1. Revisión bibliográfica	22
3.2. Caracterización del sistema bajo estudio	22
3.3. Identificación de los efectos del cambio climático	23
3.3.1. Definición del evento disruptivo a estudiar	23
3.4. Creación del índice de resiliencia	23
3.5. Implementación del índice de resiliencia en el caso de estudio	25
4. Creación del índice de resiliencia	26
4.1. Características de un red hídrica resiliente	26
4.2. Índice de Resiliencia	27
4.2.1. Subíndice de funcionalidad	28
4.2.1.1. Representación matemática	28
4.2.1.2. Caso particular: sin adaptabilidad de la red	31
4.2.1.3. Subíndice de funcionalidad de cada grupo de consumidores	32
4.2.1.4. Limitaciones	33
4.2.2. Subíndice de vulnerabilidad topológica	34
4.2.2.1. Representación matemática	35
4.2.2.2. Subíndice de vulnerabilidad topológica de cada grupo de consumidores	37
4.2.2.3. Limitaciones	37

5. Implementación en el caso de estudio	40
6. Resultados	47
6.1. Red hídrica actual del Gran Santiago	47
6.2. Red hídrica optimizada del Gran Santiago	49
6.2.1. Sin adaptabilidad de la red	49
6.2.2. Con adaptabilidad de la red	52
6.3. Análisis de los resultados	53
6.3.1. Análisis de la vulnerabilidad al cambio climático	55
6.3.2. Análisis de la importancia relativa de cada subíndice	57
7. Conclusiones	58
Bibliografía	60
Anexo A. Datos del caso de estudio	63
Anexo B. Resultados adicionales	65

Índice de tablas

2.1.	Definiciones de resiliencia de otros trabajos de investigación.	7
2.2.	Índices de resiliencia presentados en otros trabajos de investigación.	13
2.3.	Índices de resiliencia presentados en otros trabajos de investigación (continuación Tabla 2.2).	14
2.4.	Probables impactos del cambio climático en redes hídricas [32].	17
2.5.	Vulnerabilidad estimada de las fuentes de abastecimiento de la red hídrica del Gran Santiago a eventos extremos de precipitación.	19
A.1.	Demanda de cada nodo de consumo perteneciente a la red hídrica del Gran Santiago [8].	63
A.2.	Porcentaje de pérdida de agua en cada nodo dentro de la red [8].	64

Índice de ilustraciones

2.1.	Representación gráfica de una red hídrica regional [9].	4
2.2.	Representación gráfica de la calidad de la infraestructura de un sistema en el tiempo. Modificada de [4].	10
3.1.	Metodología para la creación del índice de resiliencia de una red hídrica a los efectos del cambio climático. Elaboración propia.	24
4.1.	Representación del subconjunto OUT_k . Elaboración propia.	30
4.2.	Representación de una posible limitación en la aplicación del subíndice de funcionalidad. Elaboración propia.	34
5.1.	Configuración de la red hídrica actual del Gran Santiago [9]	41
5.2.	Configuración de la red hídrica optimizada del Gran Santiago [9].	42
6.1.	Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago.	48
6.2.	Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago.	49
6.3.	Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago sin considerar su adaptabilidad al evento disruptivo.	50
6.4.	Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago sin considerar su adaptabilidad al evento disruptivo.	51
6.5.	Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo.	52
6.6.	Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo.	53
6.7.	Gráfico de resiliencia por tipo de configuración de la red hídrica del Gran Santiago.	54
6.8.	Gráfico de resiliencia de la red hídrica bajo distintos escenarios de vulnerabilidad.	56
6.9.	Gráfico de resiliencia de la red hídrica bajo distintos valores de importancia relativa de cada subíndice.	57
B.1.	Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago bajo un escenario de vulnerabilidad negativo.	65
B.2.	Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago bajo un escenario de vulnerabilidad negativo.	66
B.3.	Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago bajo un escenario de vulnerabilidad positivo.	67
B.4.	Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago bajo un escenario de vulnerabilidad positivo.	68
B.5.	Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo bajo un escenario de vulnerabilidad negativo.	69

B.6.	Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo bajo un escenario de vulnerabilidad negativo.	70
B.7.	Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo bajo un escenario de vulnerabilidad positivo.	71
B.8.	Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo bajo un escenario de vulnerabilidad positivo.	72

Capítulo 1

Introducción

La crisis mundial del cambio climático está directamente relacionada con los recursos hídricos [1]. El aumento de la variabilidad del ciclo hidrológico es uno de los principales efectos del cambio climático, lo que provoca eventos meteorológicos extremos, dificultad en la previsión de la disponibilidad de los recursos hídricos, disminuye la calidad del agua pudiendo exacerbar aún más su escasez y, además, constituye una amenaza al desarrollo sostenible, la biodiversidad y el disfrute de los derechos humanos referentes al acceso a agua potable y saneamiento en todo el mundo [2, 3].

Ante este escenario se vuelve indispensable para los países adoptar un enfoque integral del cambio climático y la gestión de los recursos hídricos, tanto en la formulación de políticas públicas como en la planificación climática nacional. Para lograr esto se deben mejorar y fortalecer las prácticas de gestión del agua, para que así las autoridades puedan tomar decisiones seguras e informadas [2].

Estas decisiones tendrán como propósito incrementar la resiliencia climática de los recursos hídricos a fin de reducir el riesgo a desastres relacionados con el agua. Es decir, la gestión de los recursos hídricos debe analizarse desde la perspectiva de la resiliencia a los efectos del cambio climático, entendiendo resiliencia como la capacidad de un sistema de adaptarse a nuevas situaciones y condiciones operativas con el propósito de mantener su funcionalidad [2, 4].

En Chile, las consecuencias del cambio climático que ya se pueden observar son: el aumento de las sequías, baja en las precipitaciones y mayor frecuencia de eventos extremos de precipitación [5]. Ante esto se vuelve esencial para las autoridades contar con infraestructura que se adapte a estas condiciones, ya que asegurar que para los próximos años todos tengan acceso a servicios de agua y saneamiento sostenibles y resilientes, es una estrategia crítica de mitigación y adaptación al cambio climático [1, 6, 7].

En vista de lo anterior, la optimización de la configuración actual de las redes hídricas, es una alternativa. Esta optimización permitiría generar sistemas de abastecimiento resilientes a los efectos antes mencionados, enfocándose también en asegurar el uso eficientemente de los recursos hídricos.

El presente trabajo de título se enmarca en el Proyecto Fondecyt “*Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation*”, cuyo objetivo general es formular y resolver un problema de optimización multi-objetivo para proponer futuros cambios en una red regional de agua [8]. Para asegurar la resiliencia de la red hídrica propuesta, se vuelve necesario contar con un indicador de resiliencia que permita medir esta característica, siendo este el objetivo general de la presente memoria.

1.1. Objetivos y Alcances

1.1.1. Objetivos

Crear un indicador de resiliencia para evaluar la adaptación del sistema hídrico de una ciudad a los efectos del cambio climático. Para ello se debe cumplir con los siguientes objetivos específicos:

1. Estudiar distintos indicadores de resiliencia en redes, en particular, de redes de procesos hídricos, con el fin de determinar la metodología adecuada para la creación del indicador.
2. Determinar los probables eventos disruptivos de la red a partir de los efectos del cambio climático que influyen en la resiliencia del sistema.
3. Representar matemáticamente el indicador de resiliencia.
4. Aplicar el indicador desarrollado al caso de estudio de la red hídrica del Gran Santiago con el fin de evaluar su resiliencia a los efectos del cambio climático.
5. Comparar la resiliencia de distintos escenarios de la red hídrica del Gran Santiago.

1.1.2. Alcances

Debido a que la creación del índice de resiliencia se da en el marco del proyecto Fondecyt antes mencionado, el indicador propuesto debe soportar su aplicación futura en problemas de optimización y permitir una ejecución ligera computacionalmente. Esto se debe abordar priorizando la linealidad del índice respecto a las variables del sistema que involucre, o en su defecto, que se puedan utilizar métodos de linealización para la aplicación del índice en el problema de optimización.

Por otro lado, el índice propuesto buscará medir aquellos aspectos de la resiliencia que puedan ser cuantificados. Cabe destacar que se busca evaluar la resiliencia de la red hídrica a eventos disruptivos que sean consecuencia del cambio climático y que también puedan ser previstos. Por último, las posibles consecuencias de estos eventos en el sistema deben ser identificables.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Antecedentes generales

El Proyecto Fondecyt “*Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation*” (en adelante ‘Proyecto’), que se desarrolla dentro del *Center for Sustainable Design and Process Systems Engineering* del Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales de la Universidad de Chile, tiene como objetivo formular y resolver un problema de optimización multi-objetivo con el propósito de proponer futuros cambios en una red regional de agua. Estas modificaciones tendrán impactos ambientales y económicos, los cuales son el foco de este problema [8].

Se espera, además, que la solución proyectada a largo plazo sea resiliente a los efectos del cambio climático. Por lo que, para abordar este propósito, uno de los objetivos específicos del Proyecto es elaborar un indicador de resiliencia que permita evaluar la adaptación al cambio climático de los sistemas hídricos potenciales, ya que de ese modo se podrá comparar la situación actual de una red hídrica con el escenario optimizado. Cabe destacar que el presente trabajo de título se enmarca dentro de dicho objetivo específico del Proyecto.

El caso de estudio utilizado en el Proyecto es la red hídrica regional de Santiago de Chile (también llamada red hídrica del Gran Santiago), dado que esta es una zona con estrés hídrico, donde la demanda de agua supera la disponibilidad de recursos [5, 8]. Por lo que la configuración de red hídrica propuesta deberá tener en consideración estos aspectos y de esa forma ser sustentable y resiliente a los efectos del cambio climático.

En el Proyecto, la red hídrica del Gran Santiago se modela como una estructura conformada por los participantes de la red, también llamados nodos, y sus respectivas conexiones o enlaces, tal como se ejemplifica en la Figura 2.1. Se puede apreciar además que estas conexiones pueden transportar agua con cinco calidades diferentes: agua cruda (o *raw water*), agua potable (o *drinking water*), agua servida (o *discharge in sewer*), agua con calidad de descarga en cauces superficiales (o *discharge in superficial water*) y agua con calidad de riego (o *irrigation*). Además, las líneas punteadas representan las posibles nuevas conexiones entre los nodos de la red.

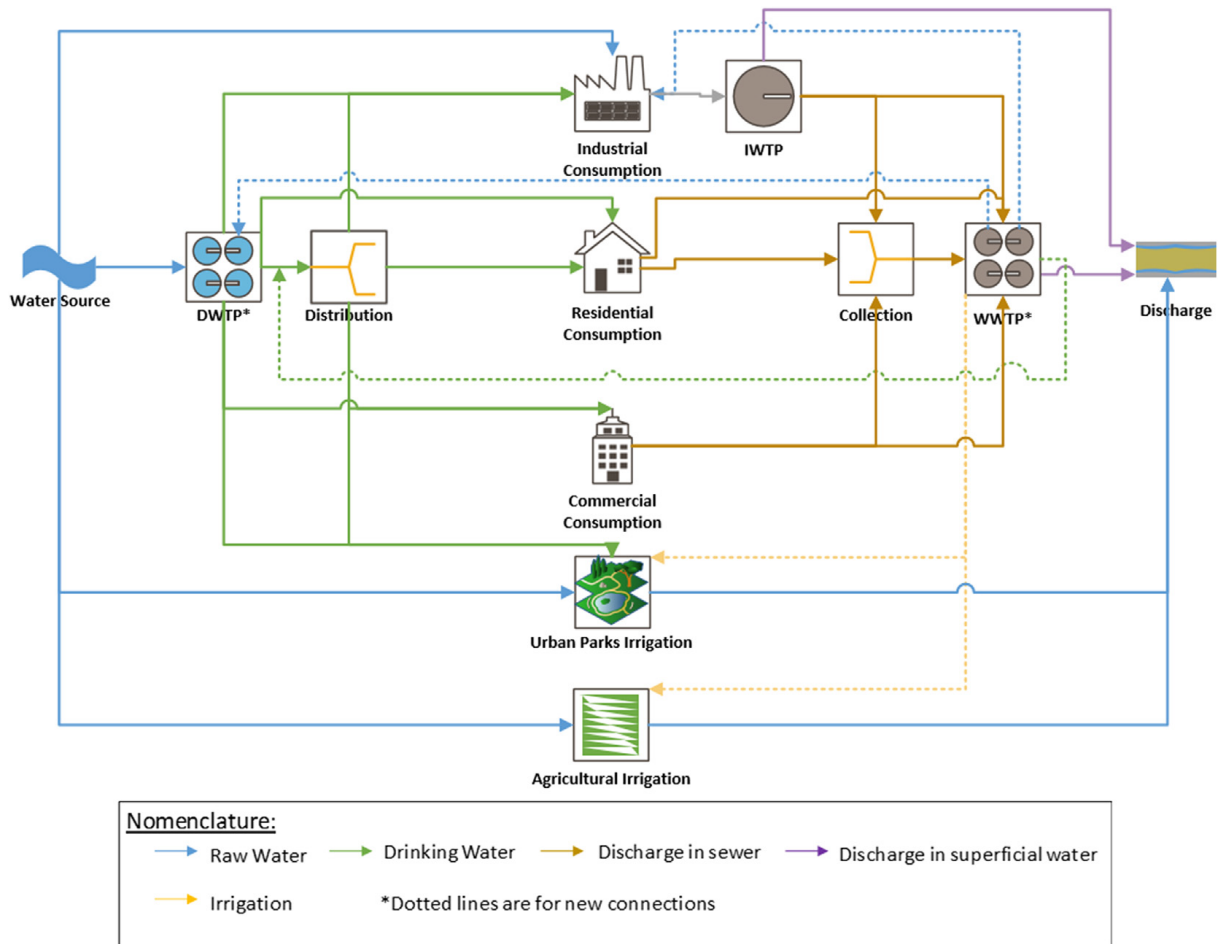


Figura 2.1: Representación gráfica de una red hídrica regional [9].

Raw water: agua cruda; **Drinking water:** agua potable; **Discharge in sewer:** agua servida; **Discharge in superficial water:** agua con calidad de descarga en cauces superficiales; **Irrigation:** agua de riego; *Las líneas punteadas representan las nuevas conexiones.

Es necesario señalar que los nodos de la red hídrica se pueden agrupar según su función dentro de la red, tal como se ejemplifica en la Figura 2.1. La caracterización mencionada se presenta a continuación:

- **Nodos Fuentes de Agua** (o *Water Source*) que corresponden a la representación de los cursos de agua que alimentan a la red hídrica de la ciudad.
- **Nodos de Consumo** que representan a los distintos usuarios de la red. Dependiendo del uso que se le dé al agua, estos nodos corresponderán el consumo residencial (o *Residencial Consumption*), comercial (o *Comercial Consumption*), industrial (o *Industrial Consumption*), del riego de áreas verdes (o *Urban Parks Irrigation*) y de riego para la agricultura (o *Agricultural Irrigation*)
- **Nodos de Plantas de Tratamiento** los cuales representan las plantas de tratamiento de agua potable (o *DWTP*), plantas de tratamiento de aguas servidas (o *WWTP*) y las plantas de tratamiento de agua industrial (o *IWTP*).
- **Nodos de Distribución** (o *Distribution*) que corresponden a nodos de transporte de agua potable dentro de la red.

- **Nodos de Colección** (o *Collection*) que corresponden a nodos de recolección de aguas servidas dentro de la red.
- **Nodos de Descarga** (o *Discharge*) que simbolizan los cursos de agua donde se descargan las aguas tratadas y/o donde llega el agua infiltrada proveniente de la agricultura y riego de áreas verdes.

Cabe destacar que para desarrollar el presente trabajo de título se asume que las redes hídricas regionales estarán conformadas por los distintos nodos y enlaces descritos anteriormente.

2.2. Resiliencia

El funcionamiento de un sistema de suministro de agua es crucial para la seguridad y el bienestar de las comunidades y de distintos sectores productivos [10]. Debido a la necesidad de contar con una planificación urbana inteligente y estratégica que asegure el completo funcionamiento del sistema, es que se vuelve esencial mejorar las acciones de mitigación previas a un posible desastre [11].

Se tiene que estrategias como la gestión de riesgos se han centrado tradicionalmente en reducir la probabilidad de eventos disruptivos y aminorar las posibles consecuencias de estos. La gestión de riesgos a menudo enfatiza las opciones de mitigación en forma de prevención y protección. El principal objetivo de la estrategia de protección es detectar la posible perturbación en el sistema tempranamente y aplazar la ocurrencia de la misma el tiempo suficiente para poder responder de forma adecuada [12].

Si bien la estrategia de protección es fundamental para evitar eventos no deseados y sus consecuencias, fenómenos climáticos recientes sugieren que no todos estos eventos pueden evitarse, sobre todo cuando son consecuencias directas del cambio climático [3]. Estos eventos disruptivos han demostrado además, que pueden afectar negativamente a múltiples sistemas de red, incluidas las redes hídricas, por lo que a lo largo del mundo ha cobrado importancia el estudio de la resiliencia de ciertos sistemas, a fin de reducir los riesgos asociados a estas interrupciones inevitables [12].

Para el presente trabajo de título se realiza una búsqueda bibliográfica enfocada en trabajos de investigación sobre resiliencia en distintas redes que involucren infraestructura crítica¹. En primer lugar se presentarán diferentes definiciones de resiliencia, para posteriormente presentar distintos índices de resiliencia junto con el contexto en el que se esta midiendo esta característica, y, finalmente, exponer una discusión sobre los indicadores en los que se basa este trabajo.

¹ Se refiere a aquellas instalaciones, redes, servicios y equipos físicos cuya interrupción o destrucción tendrá impactos debilitantes sobre la seguridad, la economía, la salud pública, el medio ambiente o cualquier combinación de estos factores [13].

2.2.1. Definiciones de resiliencia

El término resiliencia se utiliza ampliamente en distintas disciplinas de investigación, estas abarcan áreas como la psicología, sociología, economía, ecología, ciencias e ingeniería. Debido al uso multidisciplinario, resiliencia se define de diferentes formas en los distintos trabajos y áreas de investigación. De manera general, para la Real Academia Española resiliencia se define como la “capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido” [14].

Para Bruneau et al. [4], que presenta un marco conceptual para definir la resiliencia sísmica de las comunidades, resiliencia se define como “la capacidad de las unidades sociales (por ejemplo, organizaciones, comunidades) para mitigar los peligros, contener los efectos de los desastres cuando ocurren y llevar a cabo actividades de recuperación de manera que minimicen la perturbación social y mitiguen los efectos de futuros terremotos”.

Además, en este trabajo se plantea que la resiliencia esta compuesta por las siguientes cuatro propiedades:

- **Robustez:** capacidad de elementos, sistemas y otras unidades de análisis para soportar un determinado nivel de estrés o demanda sin sufrir degradación o pérdida de función.
- **Redundancia:** capacidad del sistema para atender con éxito la demanda utilizando mecanismos o rutas alternativas, redistribuyendo la demanda a sus elementos no dañados (o ligeramente dañados).
- **Capacidad de reacción**²: la capacidad de identificar problemas, establecer prioridades y movilizar recursos cuando existen condiciones que amenazan con alterar algún elemento, sistema u otra unidad de análisis.
- **Rapidez:** capacidad de cumplir con las prioridades y lograr los objetivos de manera oportuna para contener las pérdidas y evitar futuras interrupciones.

Por otra parte, Hosseini et al. [12] realiza una revisión de las definiciones y medidas de resiliencia de distintos sistemas, destacándose las definiciones sobre resiliencia en ingeniería. Dentro de esta revisión, Hollnagel et al. define resiliencia como la capacidad intrínseca de un sistema para ajustar su funcionalidad en presencia de una perturbación y cambios imprevistos. Se plantea además que, para la resiliencia en ingeniería es importante comprender tanto el funcionamiento normal de un sistema, como también su falla. Por otro lado, para la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME) resiliencia corresponde a la capacidad de un sistema para soportar interrupciones externas e internas sin discontinuidad en el desempeño de la función del sistema o, si la función está desconectada, recuperarla completa y rápidamente.

En el trabajo presentado por Valenzuela et al. [15] se busca estudiar la resiliencia de un parque eco-industrial, el cual corresponde a una red de empresas con ubicación cercana compartiendo materiales, energía, o infraestructuras. En este caso, la definición de resiliencia utilizada es la planteada por Fiksel et al. [7], donde los autores definen este concepto como

² Traducción aproximada de “*Resourcefulness*”.

“la capacidad del sistema para absorber disrupciones antes de que cambien las propiedades que controlan su funcionalidad”. Esta definición de resiliencia considera la adaptabilidad de una red para resistir un evento disruptivo y absorber sus consecuencias, considerando como un evento disruptivo cuando una empresa interrumpe su actividad perdiendo sus conexiones de entrada y salida en la red.

Un análisis sobre la resiliencia de la red mundial de cable submarino de fibra óptica (columna vertebral del Internet), es presentado por Omer et al. [16]. Este estudio se enfoca en la vulnerabilidad de la red ante desastres naturales, o provocados por el hombre, que puedan afectar esta infraestructura crítica global. Por lo tanto, resiliencia se define como “la capacidad del sistema tanto para absorber el impacto como para recuperarse rápidamente de una interrupción, de modo que pueda volver a sus niveles originales de prestación de servicios o cerca de ellos”.

A continuación, en la Tabla 2.1 se presentan definiciones de resiliencia de otras publicaciones, señalando el autor y el área de estudio correspondiente.

Tabla 2.1: Definiciones de resiliencia de otros trabajos de investigación.

Autor	Definición	Área
Todini et al. [17]	Capacidad del sistema de superar condiciones de estrés y fallas locales y garantizar la distribución de agua a los usuarios.	Redes de distribución de agua.
Liu et al. [18]	La medida de la capacidad de un sistema para resistir, adaptarse y recuperarse de una interrupción.	Sistema regional de agua.
Herrera et al. [19]	La capacidad de un sistema para mantener y adaptar su desempeño operativo frente a fallas y otras condiciones adversas.	Redes de distribución de agua.
Golara et al. [20]	La capacidad de prepararse y adaptarse a las condiciones cambiantes y resistir y recuperarse rápidamente de las interrupciones.	Redes de gas natural.
Cimellaro et al. [21]	La capacidad de mantener un nivel de funcionalidad o rendimiento durante un período determinado.	Red de gas natural.
Najafi et al. [22]	La capacidad de prepararse y planificar, absorber, recuperarse y adaptarse exitosamente a los eventos adversos.	Sistemas de distribución de energía.

La revisión de los distintos trabajos de investigación sobre resiliencia y sus respectivas definiciones indica que no existe una perspectiva única sobre cómo definir esta característica; sin embargo, se pueden observar varias similitudes entre estas definiciones, las cuales se enumeran a continuación:

1. La mayoría de las definiciones de resiliencia se enfocan en la capacidad del sistema de ‘absorber’ y ‘adaptarse’ a eventos disruptivos. En otras palabras, un factor común entre

las definiciones hace referencia a cómo el sistema va a enfrentar el evento disruptivo, ya sea absorbiendo las consecuencias y/o adaptándose a las mismas. Además, otro factor común entre todas las definiciones presentadas es el hecho de definir resiliencia como la ‘capacidad’ del sistema de completar las acciones mencionadas anteriormente.

2. A pesar de que muchas de las definiciones se enfocan en la capacidad del sistema para absorber y adaptarse, tal como se explica en el punto anterior, estas definiciones no especifican los mecanismos para lograr la resiliencia. Es decir, se hace énfasis en la capacidad del sistema de adaptarse, pero no se deja establecido, en la definición como tal, cómo se llevará a cabo esta adaptación.

En la mayoría de los trabajos presentados esta adaptación se dará a través de distintos mecanismos, como rutas alternativas en el caso de sistemas de red. Por lo que, se puede afirmar que esta información, necesaria para entender cómo funciona la resiliencia del sistema, se explica en las publicaciones presentadas pero no se incluye en la mayoría de las definiciones.

3. En otras definiciones se considera a la ‘recuperación’ como un aspecto crítico de la resiliencia, es decir, un sistema resiliente será aquel que se recupere completamente de la perturbación a la que fue expuesto. Por otro lado, en otro grupo de definiciones, esta acción no forma parte de la definición.

La diferencia anterior se explica principalmente por la temporalidad (o no temporalidad) de la evaluación que se está realizando. Esto porque, en un análisis donde se considera el tiempo, la recuperación del sistema (y la duración de esta acción) se vuelve un factor clave; en cambio, si no se está analizando el desempeño del sistema en el tiempo, para la evaluación de la resiliencia del sistema solo van a ser de interés las características de este antes y después del evento disruptivo. En resumen, ciertas definiciones enfatizan en que es necesario volver a un nivel de desempeño estable (o nivel de servicio completo), mientras que otras no imponen que el sistema vuelva a tener el nivel de función anterior al desastre para medir su resiliencia.

4. Finalmente, se tiene que la resiliencia de un sistema dependerá de la amenaza a la cual esté expuesto o con respecto a la cual se está realizando el estudio. En algunas definiciones esta amenaza se define como perturbación o evento disruptivo, en otras se nombran como fallas, condiciones adversas, o interrupciones, las cuales pueden ser a la vez internas o externas.

A partir del análisis anterior, se establece que en el presente trabajo de título se adoptará una nueva definición de resiliencia. Esta definición tomará como base aspectos de las definiciones ya presentadas y analizadas, teniendo como foco el objetivo general de la presente memoria. Por lo tanto, para evaluar la resiliencia de la red hídrica de una ciudad a efectos del cambio climático, resiliencia se define como:

"La capacidad de la configuración del sistema de soportar y absorber un determinado evento disruptivo y mantener su funcionalidad usando mecanismos o rutas alternativas".

Se adopta esta definición de resiliencia para abarcar todos los aspectos relacionados con los objetivos del presente trabajo de título. En primer lugar, se mantiene el hecho de definir

resiliencia como ‘capacidad’ debido a que es un término presente en todas las definiciones analizadas y se considera que también concuerda con el presente análisis de resiliencia.

La primera modificación con respecto a las definiciones anteriores es que resiliencia se define como la ‘capacidad de la configuración del sistema’ y no sólo como la ‘capacidad del sistema’. Esto se realiza con el objetivo de poder abarcar aspectos relacionados con la topología de las redes a analizar, es decir, vinculados a la disposición de las conexiones entre los participantes de la red, ya que este es uno de los objetivos de la presente memoria. En otras palabras, se pone el foco en el sistema pero haciendo énfasis en la importancia de su configuración.

Además, como ya se mencionó anteriormente, las definiciones de resiliencia presentan cómo se va a cumplir con esta característica. En este caso, los términos utilizados son ‘soportar y absorber’ junto con ‘mantener la funcionalidad’. Los primeros términos conservan los factores comunes de las definiciones de resiliencia, rescatando la importancia de que el sistema tenga la capacidad de tolerar un evento disruptivo y pueda absorber sus consecuencias. Por otro lado, respondiendo a la pregunta de cómo se medirá esta capacidad, es que se incluye el término relacionado a la funcionalidad del sistema.

En una red de infraestructura crítica, como lo es una red hídrica, mantener el nivel de servicio completo es un factor crucial para la población y sectores productivos que se abastecen. Por lo tanto, se puede concluir que un sistema totalmente resiliente será aquel que pueda soportar el evento disruptivo y absorber las consecuencias manteniendo la funcionalidad completa de la red. Por lo tanto, en el presente trabajo de título, la funcionalidad del sistema estará relacionada con el nivel de satisfacción de la demanda de los consumidores de una red hídrica regional.

Se destaca también que se incluye en la definición cómo se buscará mantener la funcionalidad del sistema, indicando que se utilizarán mecanismos o rutas alternativas. Se utiliza el término ‘mecanismos’ para no acotar la aplicación de la definición anterior (en el caso de que se pueda mantener la funcionalidad utilizando un método no analizado en este estudio), y se incluye el término ‘rutas alternativas’ para especificar cómo se buscará mantener la función del sistema en el caso de redes como las redes hídricas. Se recalca que para cumplir con la condición de utilizar rutas alternativas se debe estudiar la configuración del sistema, lo que justifica también la definición de resiliencia como la capacidad de la configuración del sistema y no solo del sistema.

Además, en este trabajo la perturbación a estudiar se define como ‘evento disruptivo’, el cual se determina en base a los posibles efectos del cambio climático en las redes hídricas, es decir, corresponde a un factor externo a la red.

Finalmente, se tiene que no se considera a la ‘recuperación’ como parte de la definición de resiliencia ya que en este estudio no se incluye un análisis temporal del desempeño del sistema, sino que se estudian sus características antes y después del evento disruptivo. Por esta misma razón es que las definiciones de resiliencia que si incluían a la recuperación como un factor clave no se utilizaron en este estudio, ya que con ellas se debía incluir este análisis que esta fuera de los alcances del presente trabajo de título.

2.2.2. Índices de resiliencia

En primer lugar, se debe recalcar que la mayoría de las métricas de resiliencia estudiadas determinan dicha característica comparando el desempeño del sistema antes y después del evento disruptivo, sin concentrarse mayormente en las características específicas del sistema. Sin embargo, en ciertos sistemas el desempeño de la métrica puede requerir comprender su comportamiento subyacente.

En términos generales, y según plantea Hosseini et al. [12], las distintas métricas de resiliencia se pueden caracterizar como deterministas y estocásticas, luego cada una de estas se puede utilizar para describir el comportamiento del sistema estático y dinámico. Se tiene que un enfoque determinista no incorpora incertidumbre en la métrica (por ejemplo, probabilidad de interrupción), mientras que un enfoque probabilístico si captura la estocasticidad asociada con el comportamiento del sistema. Por otro lado, un enfoque dinámico basado en el desempeño tiene en cuenta el comportamiento del sistema en función del tiempo, mientras que un enfoque estático no tiene medidas de resiliencia dependientes del tiempo.

Para Bruneau et al. [4] la resiliencia corresponde a la capacidad del sistema para reducir las probabilidades de que ocurra una perturbación, para absorberla si ocurre (reducción abrupta del rendimiento) y para recuperarse rápidamente después de la misma (restablecer el rendimiento normal). Las características de esta métrica de resiliencia puede expresarse, en términos generales, mediante los conceptos ilustrados en la Figura 2.2.

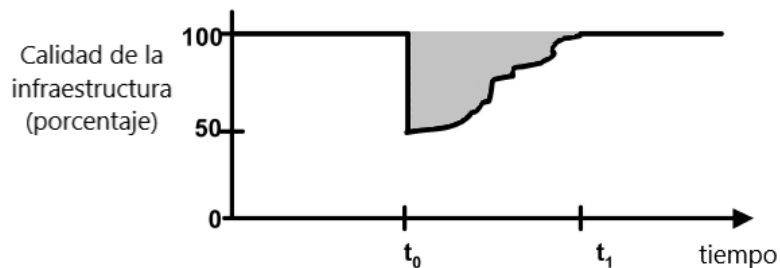


Figura 2.2: Representación gráfica de la calidad de la infraestructura de un sistema en el tiempo. Modificada de [4].

En este enfoque se ha definido la calidad de la infraestructura de una comunidad como $Q(t)$, la cual varía en el tiempo. Si ocurre un terremoto en el tiempo t_0 , podría causar un daño suficiente a la infraestructura como para que la calidad se reduzca inmediatamente. Se espera que la restauración de la infraestructura ocurra con el tiempo, hasta el momento t_1 , cuando esté completamente reparada.

Por lo tanto, la pérdida de resiliencia comunitaria por terremoto, R , se puede medir por el tamaño de la degradación esperada en la calidad (probabilidad de falla) a lo largo del tiempo, hasta su recuperación, es decir, corresponde al área gris de la Figura 2.2. Matemáticamente, se expresa mediante la Ecuación 2.1 [4].

$$R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (2.1)$$

Por otro lado, en el trabajo de Valenzuela et al. [15] sobre la resiliencia de un parque eco-industrial, se busca construir un indicador de resiliencia para determinar si las conexiones de esta red son suficientes para mantener la identidad del parque y cuantificar el rendimiento de los participantes cuando una empresa o nodo deja de compartir flujos. Cuando ese nodo se elimina de la red, ésta sufre la pérdida de conexiones y la modificación de sus flujos, ya que los participantes restantes deben compensar los flujos que se han perdido.

Por lo tanto, el indicador de resiliencia propuesto para medir esta propiedad en un parque eco-industrial se basa en dos aspectos de la red:

- El número de conexiones entre los participantes, o *Índice de conectividad de red* (NCI).
- La capacidad de los participantes para compensar la demanda de flujo cuando un participante interrumpe su actividad, o *Índice de adaptabilidad de flujos* (ϕ).

Se tiene que el objetivo de NCI es cuantificar las conexiones y medir la resistencia de toda la red frente a una posible interrupción. El enfoque principal es la configuración del parque, es decir, su topología. Por otro lado, el objetivo de ϕ es cuantificar si los flujos y las capacidades de los participantes del parque son suficientes para compensar un evento disruptivo. Esta métrica debe cuantificar el flujo necesario para mantener la operación del parque y evaluar la flexibilidad de la red para modificar los flujos restantes en consecuencia.

Finalmente, en esta publicación el indicador de resiliencia se define como una combinación de ambas métricas, donde a representa la importancia de cada subindicador, tal como se presenta en la Ecuación 2.2 [15].

$$Resilience = a \cdot NCI + (1 - a) \cdot \phi \quad (2.2)$$

Desde otra perspectiva, en el trabajo de Omer et al. [16] se presenta la medición de la resiliencia del sistema global de infraestructura de internet o también llamada red submarina global de cables de fibra óptica. Para modelar la resiliencia del sistema, este se aborda como una red lógica compuesta por nodos (regiones geográficas) conectados por enlaces (los cables de fibra óptica).

Para cuantificar analíticamente la red, se tienen en cuenta tres parámetros; la demanda del nodo, la capacidad del enlace y el flujo de tráfico de la red. Luego la resiliencia de la red se define como la relación entre la entrega de valor de la red después de una interrupción y la entrega de valor de la red antes de una interrupción, tal como se presenta en la Ecuación 2.3 [16].

$$R_{network} = \frac{V_{init} - V_{loss}}{V_{init}} \quad (2.3)$$

En la ecuación anterior la entrega de valor inicial de la red de Internet (V_{init}) es la cantidad total de información que debe transportarse a través de la red y la pérdida de valor en la entrega (V_{loss}) es la pérdida de información como resultado de daños en los cables, siendo este el evento disruptivo a estudiar.

En la Tabla 2.2 se presentan algunos de los índices de resiliencia analizados en la revisión bibliográfica del presente trabajo de título. En esta se expone la fórmula de los índices de resiliencia, se señala el autor y área de estudio, y además se explica el significado de cada término de la ecuación.

Luego, a partir de los índices de resiliencia expuestos en la Tabla 2.2 se puede afirmar que la mayoría de estas métricas se enfocan en medir la funcionalidad de la red en estudio. No obstante, en la revisión bibliográfica realizada también se pudieron encontrar distintas metodologías y métricas utilizadas en la evaluación de la topología de un sistema.

Yazdani et al. [23] muestra distintas métricas utilizadas para evaluar la estructura, la redundancia y la solidez de redes complejas. Entre estas métricas se encuentran la densidad de enlace de una red correspondiente a la fracción entre el número total y el número máximo de enlaces, además del coeficiente de malla que involucra parámetros como el número total de nodos y el número total de enlaces en la red.

En el trabajo de Farahmandfar et al. [24], tal como se muestra en la Tabla 2.2, la métrica expuesta evalúa la resiliencia sísmica topológica de redes de tuberías de agua. En esta se abarca la temporalidad y se mide la resiliencia en base a una demanda dependiente del tiempo, al número de enlaces conectados al nodo (o grado del nodo), además de otros factores como la probabilidad de falla.

Por último, para una red de distribución de agua, Cimellaro et al. [25] presenta un subíndice con enfoque social (R_1) basado en el número de usuarios que ven interrumpido el servicio ante un evento disruptivo. En esta métrica, que se podría estudiar también desde un enfoque topológico, se mide el número de nodos afectados con respecto al número total de nodos en la red.

Tabla 2.2: Índices de resiliencia presentados en otros trabajos de investigación.

Autor	Área	Índice de resiliencia
Todini et al. [17]	Redes de distribución de agua	$I_r = 1 - \frac{P_{int}^*}{P_{max}^*}$ <p>Tal que P_{int} es la cantidad de energía disipada internamente en la red para satisfacer las demandas de todos los nodos, mientras que P_{max}^* es la potencia máxima que podría disiparse.</p>
Amarasinghe et al. [26]	Sistema de suministro de agua	$R_{sp} = \frac{(S_f - S_{min})/S_f}{(P_t - P_d)/P_d}$ <p>Donde S_f es la capacidad de servicio completo; S_{min} el nivel mínimo de servicio a la presión umbral para el sistema P_t; y P_d la presión de diseño.</p>
Cimellaro et al. [25]	Redes de distribución de agua	$R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$ <p>R_1 describe la demanda y se basa en el número de usuarios temporales sin agua; R_2 describe la capacidad de la red; y R_3 se basa en la calidad del agua.</p>
Herrera et al. [19]	Redes de distribución de agua	$I_{GT}(i) = \sum_{s=1}^S \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{r(k, s)} \right)$ <p>Donde S es el número de fuentes de agua en la red y $r(k, s)$ mide la pérdida de energía (resistencia al transporte de agua) asociada con el k^{th} camino a la fuente s.</p>
Fang et al. [27]	Red de infraestructura crítica	$R(t) = \frac{\int_{t_d}^t [F(\tau) - F(t_d)] d\tau}{\int_{t_d}^t [\hat{F}(\tau) - F(t_d)] d\tau}$ <p>Con $F(t)$ como la función de desempeño del sistema; t_d el tiempo en que la interrupción deteriora el sistema; y $\hat{F}(t)$ el rendimiento objetivo.</p>
Farahmandfar et al. [24]	Sistemas de tuberías de agua	$TR = \frac{\sum_{t=1}^{t_d} \sum_{i=1}^{N_n} [(\sum_{j=1}^{N_i} (1 - P_{fj})) \cdot q_{i,t}^*]}{4 \cdot \sum_{t=1}^{t_d} \sum_{i=1}^{N_n} q_{i,t}^*}$ <p>Donde N_n el número de nodos; N_i el número de enlaces del nodo i; P_{fj} la probabilidad de falla del enlace j; y $q_{i,t}^*$ la demanda de diseño de i en t.</p>

Tabla 2.3: Índices de resiliencia presentados en otros trabajos de investigación (continuación Tabla 2.2).

Autor	Área	Índice de resiliencia
Golara et al. [20]	Redes de gas natural	$R(G, C_0) = 1 - [Max DI_{(L_{ij}; C_0)}]$ <p>Con $DI_{(L_{ij}; C_0)}$ correspondiente a la escasez de gas natural en toda la red cuando el enlace L_{ij}, de capacidad C_0, no está disponible en por algún motivo.</p>
Henry et al. [28]	Redes	$\mathcal{R}_F(t_r e_j) = \frac{F(t_r e_j) - F(t_d e_j)}{F(t_0) - F(t_d e_j)}$ <p>Donde $F(t_r e_j)$ es la función de entrega de servicio del sistema en t_r bajo el evento disruptivo e_j; $F(t_d e_d)$ es la función en el estado disruptivo; $F(t_0)$ en el estado inicial.</p>
Ikpong et al. [29]	Puentes de carretera	$BRI(W, R) = \sum_{i=1}^n W(x_i) \cdot R(x_i)$ <p>W es la ponderación de cada subíndice de resiliencia; R la calificación del puente frente a cada subíndice; y x_1 a x_n son los subíndices identificados para cada puente.</p>
Najafi et al. [22]	Red de distribución de energía.	$RI = SRI_1 + SRI_2 + SRI_3$ <p>Donde SRI_1 indica la robustez del sistema y es igual al valor mínimo de bienestar social; SRI_2 representa la recuperabilidad del sistema en un tiempo predeterminado; y SRI_3 muestra la rapidez de la recuperación del sistema.</p>
Rehak et al. [30]	Redes de infraestructura crítica.	$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i$ <p>Donde K representa a los componentes de la resiliencia, es decir, robustez, recuperabilidad y adaptabilidad; y n el número total de componentes que determinan la resiliencia.</p>

2.2.3. Análisis de la revisión bibliográfica

En el presente trabajo de título, la construcción del índice de resiliencia incorpora distintos aspectos de los indicadores y trabajos de investigación expuestos anteriormente. A continuación se discute la pertinencia de su incorporación y se detalla que aspectos de cada trabajo se incluyen en el desarrollo del índice de resiliencia.

En primer lugar, la composición del índice de resiliencia global, se basa en el indicador de resiliencia de Valenzuela et al. [15]. Esta definición, presentada en la Ecuación 2.2, permite evaluar los aspectos relacionados tanto con la funcionalidad como también con la topología de la red, a través de la incorporación de subíndices. Sumado a esto, en otros trabajos de investigación también se incluye el uso de subindicadores para evaluar distintas características de los sistemas en estudio [21, 22, 30].

Se tiene que, en base a la definición de resiliencia construida en el presente trabajo, para asegurar la resiliencia del sistema bajo estudio se deben evaluar tanto los aspectos relacionados con la configuración de la red, así como también con la función del sistema. Por lo tanto, en este estudio se evaluará tanto la funcionalidad como la topología del sistema a través del uso de subindicadores. Se destaca que estos no necesariamente tendrán la misma importancia en el cálculo de la resiliencia global del sistema, por lo que definir el índice de resiliencia en base a la Ecuación 2.2, donde la importancia de cada subíndice se fija con el parámetro a , se considera pertinente al presente trabajo de título.

Por otro lado, para evaluar la redundancia o capacidad de adaptación de la red mediante el uso de rutas alternativas, se incorporan aspectos del *Índice de adaptabilidad de flujo* presentado por Valenzuela et al. [15]. En el desarrollo de dicho subíndice se tienen en consideración aspectos como la capacidad adicional de los participantes, el flujo que se pierde debido a un evento disruptivo, y en general se aborda cómo la red puede adaptarse a esa pérdida de flujo.

En el desarrollo del *Índice de adaptabilidad de flujo* se considera que las distintas empresas que forman parte del parque eco-industrial comparten un mismo tipo de material, y dado que en el presente estudio el material que comparten los distintos nodos es agua, se considera adecuado basarse en dicho desarrollo [15]. La diferencia principal estará dada por el evento disruptivo a evaluar, en el trabajo de Valenzuela et al. se estudia la falla total de un nodo, en cambio, en el presente estudio se busca evaluar fallas parciales. Los detalles se presentan en el Capítulo 4: Creación del índice de resiliencia.

Dentro de los trabajos utilizados como base en la definición del índice de resiliencia se encuentra también el de Omer et al. [16]. De esta publicación se utiliza la definición general del índice de resiliencia, presentada en la Ecuación 2.3 para medir la funcionalidad de la red hídrica. Se tiene que esta definición evalúa el nivel servicio entregado por una red antes y después de un evento disruptivo, lo cual es atingente al presente trabajo ya que no se incorpora un análisis de la función del sistema en el tiempo.

En el caso de la red analizada por Omer et al. [16], el nivel de servicio se mide a través del cumplimiento de la demanda de los distintos nodos de la red, y dado que se analizaba la

red global de internet, la demanda en este caso corresponde a una cierto flujo de información medido en Mega-bytes por día. Luego, en el caso de un red hídrica, este nivel de servicio se transforma en el total de agua abastecida a los usuarios; por lo que, adaptar la especie o elemento que se esta proporcionando a los consumidores, no implica una modificación en el planteamiento de la fórmula utilizada.

En relación a la evaluación de las características topológicas de la red, no se utiliza una definición de resiliencia en específico, pero si se incorporan parámetros presentados por Cimellaro et al. [25] en la medición, como lo es el número de conexiones que posee un nodo, y el número total de consumidores que posee una red. Se incluyen además en la construcción de este subíndice otras características y supuestos que serán detallados en el Capítulo 4: Creación del índice de resiliencia.

Uno de los aspectos relevantes que se incluirá en la evaluación de la resiliencia de la configuración del sistema, es que se buscará evaluar la vulnerabilidad de los nodos de consumo a los eventos extremos de precipitación, según sus conexiones en la red y sus fuentes de abastecimiento, y con ello, determinar su resiliencia. El detalle de este análisis de vulnerabilidad se presenta en la Subsección 2.3.1: Vulnerabilidad de una red hídrica.

Con respecto a la representación de las redes, se encuentran características comunes entre los distintos trabajos de investigación. Los participantes de las diferentes redes se representan por nodos y las conexiones físicas entre los distintos nodos se conocen como enlaces. Tal como plantea Fang et al. [27], en una red hídrica no todos los nodos son iguales, existen nodos de demanda (que representan a los consumidores), nodos de transmisión, nodos de tratamiento y nodos alimentadores.

En general, en la mayoría de los trabajos presentados y utilizados como referencia, no se hace diferencia entre los participantes de la red. En el caso de Valenzuela et al. [15], todos los nodos (o empresas) tienen asociada una demanda, al igual que todos los nodos (o regiones geográficas) en la representación de la red global de internet de Omer et al. [16]. De todas formas, a pesar de lo anterior, los índices de referencia sí permiten una aplicación/adaptación a la representación de la red hídrica del presente trabajo de título. Para esto, en vez de realizar la medición considerando una demanda en todos los nodos de la red, esta evaluación se debe acotar sólo a los consumidores, ya que ellos son el foco en una red hídrica.

Finalmente, se puede afirmar que, para evaluar la resiliencia de una red hídrica en el presente trabajo de título se hace particular énfasis en los nodos de consumo y el correspondiente nivel de servicio entregado por la red.

2.3. Efectos del cambio climático en redes hídricas

En esta sección se examinan los impactos observados y pronosticados del cambio climático en los sistemas hídricos según se informa en la literatura. Se muestra una descripción general de los impactos potenciales, para posteriormente enfocarse en los eventos extremos de precipitación como posible evento disruptivo que puede afectar a una red de abastecimiento de agua. La información expuesta se basa principalmente en el “*Documento técnico VI del IPCC: El Cambio Climático y el Agua*” [3].

De manera general, los principales efectos del cambio climático que se observan actualmente y se seguirán observando a nivel mundial son: el aumento de la temperatura atmosférica, disminución de la disponibilidad del agua en cuencas alimentadas por glaciares en retracción, aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos, crecidas que afectarán la calidad del agua y la integridad de la infraestructura hidrológica, acentuando la erosión fluvial e introduciendo así diversos tipos de poluyentes en los recursos hídricos, y por último sequías que afectarán la disponibilidad y calidad del agua [3].

Por lo anterior, se espera que en todo el mundo el cambio climático aumente la incertidumbre en la disponibilidad de los recursos hídricos al alterar la frecuencia, la intensidad y la duración de eventos meteorológicos extremos (EME). En consecuencia, implementar medidas estructurales de adaptación adecuadas en el sector del agua es clave para enfrentar estos eventos [31].

Se espera que el aumento proyectado de los EME resulte en un incumplimiento más frecuente de los umbrales de diseño de los sistemas de abastecimiento de agua, ya que su diseño se basó en las condiciones climáticas del pasado que, debido al cambio climático, ya no son buenos predictores del futuro. Cualquier aumento en la frecuencia de EME también puede resultar en márgenes operativos más estrechos entre el ‘funcionamiento normal’ y los eventos disruptivos, reduciendo la eficiencia de los sistemas hídricos [32]. En la Tabla 2.4 se presentan probables impactos del cambio climático en redes de infraestructura hídrica.

Tabla 2.4: Probables impactos del cambio climático en redes hídricas [32].

Proyección del cambio climático	Tipo de infraestructura	Impacto
Aumento de la temperatura y temperaturas extremas.	Sistema de suministro de agua.	El aumento de la temperatura y los consecuentes cambios en las precipitaciones anuales y estacionales tendrán impactos en la calidad del agua cruda y la disponibilidad y confiabilidad de los recursos.
Aumento de los eventos de precipitación extrema.	Red de aguas pluviales.	Las lluvias extremas pueden exceder la capacidad de la red de aguas pluviales, causando inundaciones o incluso destruyendo partes de la red.

En particular, se ha observado en todo el mundo un aumento de los episodios de precipitación intensa, incluso en lugares en que la cantidad total de precipitaciones ha disminuido. Este incremento está asociado a un aumento de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, y se corresponde con el aumento de temperatura observado a nivel mundial. Esta conclusión se obtiene a partir de estudios teóricos y de modelación del clima que sugieren que, en un clima cada vez más cálido por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, se esperaría un incremento de las precipitaciones extremas respecto de su valor medio [3].

A partir de lo anterior, se tiene que en el *Documento Técnico VI del IPCC* las proyecciones indican que los episodios de precipitación intensa serían más frecuentes en la mayoría de

las regiones durante el siglo XXI [3]. Ello aumentaría el riesgo de crecidas repentinas y de inundaciones en núcleos urbanos. Cabe destacar que los procesos de crecida están influidos por diversos procesos climáticos y no climáticos que pueden originar crecidas fluviales, crecidas repentinas, inundaciones urbanas, inundaciones de la red de alcantarillado, etc.

Se afirma que la precipitación intensa y/o prolongada es uno de los procesos causantes de las crecidas; por lo tanto, este fenómeno dependerá de la intensidad, volumen, fechas, fase (lluvia o nieve) de la precipitación, así como también del estado previo de los ríos y de sus cuencas de drenaje, de la humedad, de la tasa y fechas del deshielo, y de la urbanización.

Cabe recordar que en 2017, los aluviones ocurridos en San José del Maipo, con consecuencias en el río Maipo (fuente superficial de la red hídrica del Gran Santiago), obligaron a Aguas Andinas³ a realizar un corte de emergencia en el suministro a 30 comunas de la Región Metropolitana. La medida fue impulsada debido a los altos índices de turbiedad registrados en el agua. Dichos aluviones fueron consecuencia directa de un episodio de precipitación intensa acontecido en la región [5].

Sumado a lo anterior, Chile y, en particular, la zona centro-norte del país, esta enfrentado una escasez hídrica hace varios años, producto también de los efectos del cambio climático [5]. Por otro lado, en el *Documento Técnico VI del IPCC* se afirma que asociado al riesgo de sequía, sobrevendría un aumento del riesgo de precipitaciones e inundaciones intensas, debido a que, según las proyecciones, la precipitación se concentraría en episodios más intensos, intercalados por periodos de menor precipitación más duraderos. Así pues, habría esporádicamente lluvias intensas y abundantes con un gran volumen de escorrentía, con periodos secos relativamente más largos.

En conclusión se puede afirmar que la zona central de Chile, en particular la red hídrica del Gran Santiago (caso de estudio del presente trabajo de título), es vulnerable a los eventos extremos de precipitación. Por lo tanto, será éste el evento disruptivo a evaluar en el análisis de la resiliencia de la red hídrica en estudio. Luego, el concepto de vulnerabilidad utilizado anteriormente, y su directa relación con la resiliencia de un sistema, se explica en la subsección siguiente.

2.3.1. Vulnerabilidad de una red hídrica

En primer lugar, Steveninck et al. [33] define vulnerabilidad al cambio climático como el grado en que un sistema es susceptible o incapaz de hacer frente a los efectos adversos de este fenómeno, incluida la variabilidad y los extremos climáticos. Se plantea también que la vulnerabilidad depende del carácter, la magnitud y la velocidad del cambio climático y de las variaciones a las que está expuesto un sistema. Por lo tanto, se puede afirmar que la vulnerabilidad se relaciona con el impacto inicial experimentado por la red después de un evento disruptivo, lo que se puede traducir en la funcionalidad reducida de ciertos componentes de la red.

En otros trabajos de investigación, vulnerabilidad se define como la exposición a perturbaciones, y se utiliza una relación específica entre resiliencia y vulnerabilidad, en la

³ Empresa sanitaria encargada del abastecimiento de agua de la Región Metropolitana.

que la resiliencia es un complemento relativo de la vulnerabilidad [29, 34]. Por otro lado, para Maiolo et al. [35] la vulnerabilidad mide cuán frágil es un sistema, es decir, a un valor más alto de vulnerabilidad significa que la red es propensa a fallar en el cumplimiento de las condiciones de su servicio.

Se plantea además, que el interés en estudiar la vulnerabilidad de un sistema nace con el fin de desarrollar un enfoque que describa la interacción entre un evento disruptivo y el desempeño subsiguiente del sistema, para cuantificar la degradación de funciones específicas del servicio. Al comprender estos efectos, se pueden identificar a los elementos del sistema que, cuando se produce el evento disruptivo, pueden verse directamente afectados [36]. A dichos elementos del sistema se les conocerá como nodos de vulnerabilidad.

Por lo tanto, el siguiente paso en el presente trabajo de título es definir e identificar a los nodos de vulnerabilidad dentro de la red, para luego asignar un valor de vulnerabilidad según los efectos del cambio climático presentados en la revisión bibliográfica de la sección anterior.

Dado que las fuentes de agua serán los nodos que en un primera instancia se enfrentarán directamente a las consecuencias de los eventos extremos de precipitación, serán consideradas nodos de vulnerabilidad dentro de la red. Además, en una de las configuraciones a analizar en el caso de estudio (presentadas en el Capítulo 5), también existen PTASs que alimentan a ciertos usuarios de la red, y, debido a que estas instalaciones a la vez pueden ser vulnerables al evento disruptivo estudiado, también se considerarán nodos de vulnerabilidad. Por lo tanto, en el presente trabajo los nodos de vulnerabilidad corresponderán a todas las fuentes de agua que alimentan a los usuarios de la red.

En consecuencia, a las distintas fuentes de agua se les asignará un valor de vulnerabilidad estimado, el cual se fija según el riesgo probable que enfrentan estos nodos ante la ocurrencia de un evento de precipitación extrema. Cabe destacar que este parámetro esta sujeto a la incertidumbre de los estudios de proyección climática y se asigna en base a estudios generales de efectos del cambio climático y no a un análisis hidrológico específico de la cuenca del Gran Santiago, el cual permitiría disminuir dicha incertidumbre. Por último los valores asignados a las fuentes de agua del caso de estudio se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Vulnerabilidad estimada de las fuentes de abastecimiento de la red hídrica del Gran Santiago a eventos extremos de precipitación.

Fuentes de abastecimiento de la red	Vulnerabilidad de la fuente
Fuentes de agua superficiales	40 %
Fuentes de agua subterráneas	0 %
Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas	20 %

En base a los efectos del cambio climático ya mencionados, se establece que, el escenario probable que se busca evaluar en el caso de estudio considera un 40% de vulnerabilidad para las fuentes superficiales. Esto se explica porque los cauces de agua superficiales serían los más afectados por estos fenómenos meteorológicos extremos, debido a que se podrían generar crecidas que afectarían la calidad del agua y/o la infraestructura hidrológica a causa de un posible aumento repentino de los cauces.

Por otro lado, con respecto a las fuentes de agua subterráneas se puede afirmar que el cambio climático puede afectar a la rapidez de recarga y al espesor de las masas freáticas. Sin embargo, no existe un conocimiento acabado sobre la recarga y los niveles actuales, tanto para los países desarrollados como en desarrollo [3]. Teniendo en cuenta lo anterior y que, además, ha habido muy pocas investigaciones sobre el impacto futuro del cambio climático en las aguas subterráneas (o sobre las interacciones entre el agua subterránea y el agua superficial), es que no se puede afirmar con certeza que esta fuente sea directamente vulnerable a un evento disruptivo como las precipitaciones intensas. Por lo tanto, se considera a esta fuente de agua como no vulnerable.

Luego, se puede afirmar que las instalaciones sanitarias de PTASs también se podrían ver afectas por estos eventos de precipitación, pero tendrían un menor riesgo que las fuentes superficiales. Estos nodos de PTASs podrían enfrentarse a inundaciones debido a un posible aumento de aguas pluviales en la ciudad ante inundaciones en núcleos urbanos, o a inundaciones en la red de alcantarillado. Por lo tanto, se les asigna una vulnerabilidad de 20%.

Finalmente, se puede afirmar que en este trabajo de título la vulnerabilidad se entenderá como una medida de la importancia (o consecuencias) del impacto de un evento extremo de precipitación, en los nodos de vulnerabilidad de la red en estudio.

2.3.2. Análisis de los efectos del cambio climático y resiliencia en una red hídrica

A partir de la información bibliográfica expuesta anteriormente referente al cambio climático, se puede afirmar que se proyectan distintos eventos climáticos que pueden afectar a una red hídrica. No obstante, la probabilidad de que estos ocurran y sus posibles consecuencias dependen directamente de la zona geográfica donde se ubique la red hídrica que se está analizando.

En el caso del Gran Santiago, el evento disruptivo probable es un episodio de precipitación extrema. Si bien éste es el fenómeno seleccionado para el presente caso de estudio, se puede afirmar que, dadas las características del índice de resiliencia (Capítulo 4: Creación del índice de resiliencia), se podría evaluar la resiliencia de la red considerando otro evento disruptivo. Para ello se deberían seleccionar los nodos vulnerables a dicho evento y fijar el parámetro de vulnerabilidad asociado a cada uno, a partir de sus posibles efectos en la red.

Por otro lado, se tiene que las consecuencias del cambio climático presentadas anteriormente se ubican en un horizonte temporal a corto plazo (2016-2035), pero de todas formas se destaca que también existen proyecciones de eventos climáticos a largo plazo (2081-

2100) no detalladas en el presente trabajo [32]. Se decide analizar las posibles consecuencias a corto plazo debido a que la incertidumbre asociada a estas proyecciones climáticas es menor que en el caso de los estudios a largo plazo. De esta forma se añade mayor seguridad al análisis de vulnerabilidad de los nodos pertenecientes a la red.

Junto con lo anterior, se hace énfasis en que el presente análisis busca evaluar la resiliencia a un evento disruptivo, y no a cambios progresivos en el tiempo que puedan generarse producto del cambio climático. En otras palabras, se busca evaluar el impacto de un evento en particular en el sistema y sus consecuencias inmediatas, analizando la función del sistema antes y después de dicho evento, y conforme a ello, no se incluye la temporalidad en el análisis.

Con respecto a las definiciones de resiliencia e índices de resiliencia presentados en la sección anterior, se puede afirmar que una perturbación que sea consecuencia del cambio climático encaja como evento disruptivo a analizar. Esto porque en varios de estos estudios se analiza también la resiliencia de un sistema a efectos del cambio climático [11, 22, 26, 29, 32]. Lo anterior indica una creciente preocupación por construir herramientas que permitan evaluar y posteriormente asegurar la resiliencia de sistemas críticos a eventos imprevistos, siendo esta una de las motivaciones del presente trabajo de título.

Capítulo 3

Metodología

La metodología utilizada en el presente trabajo de título se compone de cinco etapas principales. En primer lugar, se lleva a cabo una revisión bibliográfica sobre índices de resiliencia, para luego pasar a caracterizar el sistema bajo estudio a fin de comprender su funcionamiento. Posteriormente, se identifican de los posibles efectos del cambio climático en un red hídrica y junto con ello se definen el evento disruptivo que será estudiado. Una vez que se completan las etapas anteriores se desarrolla el índice de resiliencia y seguidamente se implementa en el caso de estudio seleccionado. Cada una de las etapas mencionadas se detallan en las siguientes secciones.

3.1. Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica realizada consistió en la búsqueda de publicaciones relacionadas con la resiliencia en redes, centrandó el análisis en los índices de resiliencia de redes hídricas y en aquellos trabajos que buscaban medir las consecuencias del cambio climático.

En cada una de las publicaciones mencionadas se analizaba la definición de resiliencia en la que se basaba el estudio, el respectivo índice de resiliencia, el evento disruptivo o característica que se evaluaba de la red y los elementos que se podrían aplicar en el presente trabajo de título. La búsqueda bibliográfica también incluyó aquellos estudios que no presentaban un marco cuantitativo de resiliencia, sino cualitativo.

Con respecto a los efectos del cambio climático, en la búsqueda bibliográfica se dio énfasis a los documentos técnicos donde los efectos del cambio climático se presentan de manera general y específica, por región y por tipo de infraestructura crítica vulnerable a estos eventos.

3.2. Caracterización del sistema bajo estudio

El sistema bajo estudio es la red hídrica regional de una ciudad, y dada su extensión, esta puede estar compuesta de distintos elementos, como por ejemplo consumidores, plantas de tratamiento, nodos de distribución/recolección, etc.

Para llevar cabo este estudio se debió caracterizar el sistema con el fin de estandarizar la conformación de las redes hídricas regionales, y del mismo modo, facilitar una futura

aplicación del índice de resiliencia en otros sistemas hídricos que puedan representarse de la misma forma. Además, esta caracterización permite simplificar una posible red regional compleja a una red en la que se pueda conocer y comprender la función de cada uno de los elementos que la componen.

Finalmente, la caracterización seleccionada fue la utilizada en el Proyecto, la cual fue presentada en la sección 2.1. Antecedentes generales [8].

3.3. Identificación de los efectos del cambio climático

Dentro de la revisión bibliográfica realizada en el primer paso de la metodología, se abarcan también los trabajos de investigación sobre posibles efectos del cambio climático. En esta búsqueda se dio mayor énfasis a aquellas publicaciones enfocadas en los efectos y consecuencias del cambio climático en redes de infraestructura crítica.

A partir de la información obtenida se tiene que los efectos del cambio climático en las distintas redes de una ciudad pueden ser variados y generar un grado diferente de alteración. Es por esto que se requiere incluir en la metodología una sub-etapa en la que se defina el evento disruptivo que se va a analizar.

3.3.1. Definición del evento disruptivo a estudiar

Este paso consiste en definir el evento disruptivo que se busca evaluar mediante el índice de resiliencia, y con ello definir también qué elementos de la red se verán directamente afectados. En la Sección 2.3: Efectos del cambio climático en redes hídricas, se presentan los estudios sobre efectos del cambio climático mencionados anteriormente, y las principales conclusiones y precisiones obtenidas de este análisis.

El evento disruptivo que se busca evaluar en el presente trabajo de título son los episodios de precipitación extrema, que afectarán en distinto grado a las fuentes que abastecen a la red.

3.4. Creación del índice de resiliencia

Una vez que se tiene definido el evento disruptivo que se busca evaluar, y además, se tienen caracterizados los distintos elementos que conforman una red hídrica regional, se puede partir con la etapa de construcción del índice de resiliencia.

Esta etapa de la metodología esta compuesta por distintos pasos que deben cumplirse para completar la construcción del índice de resiliencia. Cada uno de estos pasos se ejemplifican mediante el diagrama mostrado en la Figura 3.1 y se abordan con mayor detalle a continuación.

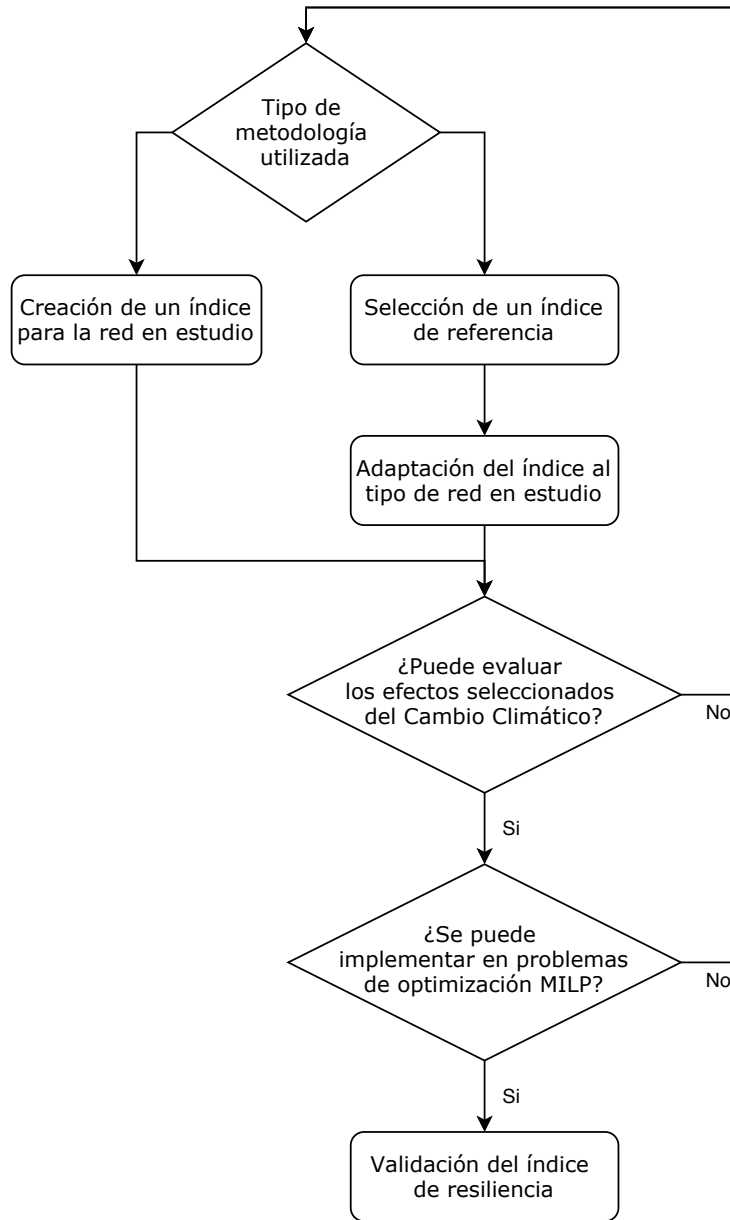


Figura 3.1: Metodología para la creación del índice de resiliencia de una red hídrica a los efectos del cambio climático. Elaboración propia.

En primer lugar se define el tipo de metodología utilizada para la construcción del índice; específicamente, para cada característica relacionada con la resiliencia del sistema que se busca evaluar, se decide si se tomará como referencia algún índice de resiliencia de literatura, o se creará uno nuevo sin basarse mayormente en otro trabajo de investigación. Cabe destacar que se sigue este procedimiento tanto para la definición del índice de resiliencia global, así como también para los subíndices que lo conforman.

Si se decide crear un nuevo índice, este se debe construir para ser directamente aplicado en la red hídrica definida. En cambio, si se decide seleccionar un índice de literatura como referencia, este luego se debe adaptar a la red hídrica en estudio, para que así pueda ser aplicado en la misma. Cabe destacar que en el presente trabajo de título se tomaron ambas opciones en cuanto a la creación de cada subíndice.

El paso siguiente, para cualquiera de los dos casos anteriores, es verificar si efectivamente el índice propuesto esta evaluando correctamente la resiliencia de la red al efecto del cambio climático seleccionado. En otras palabras se comprueba si, en efecto, el índice representa lo que verdaderamente se busca representar. Si no se cumple con esta condición, se debe volver al paso inicial seleccionando nuevamente la metodología de construcción utilizada, y si se cumple la condición, se sigue al siguiente paso.

La segunda condición que debe cumplir el índice de resiliencia propuesto es que debe poder implementarse en problemas de programación lineal enteros y mixtos (en inglés *Mixed Integer Linear Programming, MILP*). Si no se cumple con la linealidad del índice se debe proponer un método de linealización para asegurar su aplicación en los problemas antes mencionados. De no cumplirse esta condición se vuelve al paso inicial, y si se cumple corresponde avanzar al paso siguiente.

La última etapa de esta metodología de construcción del índice de resiliencia consiste en la validación del mismo. Esta se realiza aplicando el índice en diferentes redes hídricas, así como también probándolo en algunos problemas de optimización simples con respecto a la optimización de una red real, también conocidos como *toy problems*. Una vez que se valida el índice de resiliencia construido en este trabajo, se completa la etapa de creación del índice en la metodología general.

3.5. Implementación del índice de resiliencia en el caso de estudio

Como ya se menciona en el Capítulo 1: Introducción, el caso de estudio utilizado en el presente trabajo de título es la red hídrica del Gran Santiago. De esta red se cuenta con dos configuraciones: la primera es una representación de la configuración actual y la segunda es la configuración optimizada obtenida como resultado en el Proyecto Fondecyt.

Para medir la resiliencia de la configuración actual de la red, se construye un documento en Excel utilizando la información disponible del Proyecto [8]. En cambio, como los resultados de la red optimizada se obtienen de un problema de optimización en el programa GAMS, se formulará un nuevo problema de optimización para calcular la resiliencia del sistema, utilizando los resultados del primero. En ambos casos se aplica la misma definición del índice de resiliencia y se utilizan los mismos parámetros, para posteriormente comparar y analizar los resultados.

En el Capítulo 5: Implementación en el caso de estudio, se expone el desarrollo de esta aplicación del índice para ambas configuraciones de la red hídrica del Gran Santiago. Luego, en el Capítulo 6: Resultados, se muestran los principales resultados de la implementación del índice y su respectivo análisis.

Capítulo 4

Creación del índice de resiliencia

En el presente capítulo se expone el desarrollo de la construcción del índice de resiliencia para evaluar la resiliencia de la red hídrica de una ciudad a los efectos del cambio climático. Cabe destacar que el índice se construye mediante la metodología expuesta en el capítulo precedente y en base a los antecedentes presentados en el Capítulo 2.

En particular, este indicador busca evaluar la resiliencia de una red hídrica a eventos extremos de precipitación ya que estos afectarán el desempeño de la red [3]. Además, se tiene que el nivel de afección que se generará dependerá de la vulnerabilidad de ciertos nodos a estos eventos climáticos. Ante esta situación se vuelve importante conocer la magnitud del impacto en la red hídrica, y también cuánto se afectaría el nivel de servicio que se entrega finalmente a los usuarios y la seguridad del mismo dada la configuración del sistema.

4.1. Características de un red hídrica resiliente

Antes de definir como se medirán los efectos de los eventos extremos de precipitación en una red hídrica y de construir el índice como herramienta de medición, se deben especificar las características que debe poseer la red para calificarse como una red resiliente a estos efectos del cambio climático.

En base a la revisión bibliográfica realizada, en este trabajo resiliencia se define como *“la capacidad de la configuración del sistema de soportar y absorber un determinado evento disruptivo y mantener su funcionalidad usando mecanismos o rutas alternativas”*. Y además, se tiene que el objetivo principal de una red hídrica es asegurar y satisfacer las necesidades de consumo de sus usuarios.

Por lo anterior, se puede afirmar que una red hídrica completamente resiliente será aquella que posea una configuración capaz de soportar los eventos disruptivos y pueda mantener un nivel de servicio completo abasteciendo la totalidad del agua demandada a los usuarios de la red. En otras palabras, se debe asegurar que la configuración de la red sea topológicamente resiliente al evento disruptivo evaluado y también que el sistema pueda absorber los efectos de dicho evento con el fin de mantener su función. Cabe destacar que los efectos del cambio climático en la red se representarán mediante un parámetro de vulnerabilidad asociado a las fuentes de abastecimiento del sistema (Subsección 2.3.1: Vulnerabilidad de una red hídrica).

Por lo tanto, para evaluar como el evento disruptivo afecta la funcionalidad de la red hídrica, la vulnerabilidad de los nodos de abastecimiento se traducirá en una reducción de la capacidad de abastecimiento de dichos nodos, a las correspondientes Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) o directamente a los usuarios. Por definición el sistema puede utilizar rutas alternativas a fin de mantener la función del mismo, así, una red hídrica será completamente resiliente desde el punto de vista de la funcionalidad si tiene la capacidad de abastecer la totalidad del agua demandada por los usuarios. En consecuencia, la funcionalidad del sistema se evalúa por el nivel de satisfacción de la demanda.

Por otra parte, para estudiar los aspectos relacionados con la confiabilidad de la configuración del sistema es necesario realizar un análisis de la vulnerabilidad estructural del mismo. Para este análisis se debe llevar a cabo un estudio de la topología de la red y su conectividad, es decir, un seguimiento de como se proyecta en el sistema la vulnerabilidad de los nodos de abastecimiento antes mencionados, y como esta proyección afecta la seguridad del abastecimiento a los usuarios. Así, el sistema será resiliente topológicamente si los usuarios dependen estructuralmente de fuentes no vulnerables.

Finalmente, a partir de ambas características se establece que una red hídrica será completamente resiliente si lo es tanto desde la perspectiva de su funcionalidad, así como también si no es topológicamente vulnerable. Por lo tanto, el índice de resiliencia que se construye a continuación considera estas dos propiedades.

4.2. Índice de Resiliencia

El índice que se propone en el presente trabajo busca describir la resiliencia de una red hídrica mediante un porcentaje, en donde 0 % representa un sistema con resiliencia nula y 100 %, un sistema completamente resiliente. Este índice, denotado como R , estará compuesto por dos subíndices, tal como se muestra en la Ecuación 4.1, los cuales deberán cumplir con las mismas condiciones porcentuales anteriores.

$$R = \beta \cdot R^F + (1 - \beta) \cdot R^{VT} \quad (4.1)$$

El primer subíndice, representado por R^F , tiene como objetivo evaluar la funcionalidad de la red, y el segundo, denotado R^{VT} , busca medir la resiliencia de la configuración mediante una evaluación de la vulnerabilidad topológica del sistema. A su vez, el parámetro β de la Ecuación 4.1 representa la importancia relativa que aportaría cada subíndice al índice de resiliencia [15].

En concordancia con la sección anterior, el subíndice de funcionalidad evalúa el nivel cumplimiento de la demanda de los usuarios cuando el sistema esta sujeto a la vulnerabilidad de sus nodos de abastecimiento, y el subíndice de vulnerabilidad topológica mide la dependencia de los usuarios de estos nodos de abastecimientos vulnerables y no vulnerables en base a las conexiones existentes en la red.

En las secciones siguientes se detalla el procedimiento que se lleva a cabo para obtener el subíndice de funcionalidad y el subíndice de vulnerabilidad topológica, respectivamente.

4.2.1. Subíndice de funcionalidad

El subíndice de funcionalidad busca representar la magnitud de la pérdida de flujo a la que se puede ver enfrentada la red, ante la ocurrencia de un evento disruptivo. Este evento puede afectar parcial o totalmente la capacidad de abastecimiento de las fuentes de agua de la red hídrica y con ello puede reducirse el abastecimiento a los consumidores.

Por lo tanto, es necesario contar con un índice de funcionalidad tanto para evaluar el desempeño del sistema ante estas posibles fallas, así como también para determinar si los flujos en el sistema pueden adaptarse para compensar esa pérdida, y por ende, hacer que la red sea más resiliente.

Se tiene que en una red hídrica el principal objetivo es satisfacer la demanda de los usuarios, por ende, será éste el factor a evaluar por el subíndice de funcionalidad presentado en esta sección. A continuación se presenta del desarrollo matemático mediante el cual se define el subíndice y los parámetros necesarios para su cálculo.

4.2.1.1. Representación matemática

En primer lugar el subíndice de funcionalidad de la red hídrica de una ciudad (R^F) quedará definido según la Ecuación 4.2, presentada a continuación. Se destaca que esta ecuación se basa en la definición del índice de resiliencia de Omer et al. [16] para la red global de internet, presentada en la Ecuación 2.3.

$$R^F = \frac{V^{dem} - V^{loss}}{V^{dem}} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Luego, en este caso,

- V^{dem} corresponde al flujo total de agua con el que se satisface la demanda de todos los nodos de consumo.
- V^{loss} el flujo total de agua no producido debido al evento disruptivo.

El numerador de la Ecuación 4.2 ($V^{dem} - V^{loss}$) corresponde, por lo tanto, al flujo total de agua que reciben los usuarios después de la ocurrencia del evento disruptivo. Luego, este término se divide por el flujo total de agua demandada V^{dem} para normalizar el valor de este subíndice. Así la red estudiada será funcionalmente resiliente si la pérdida es nula, y 0% resiliente si la pérdida es total.

A partir de los anterior se introduce el término V^{pde} , a través de la Ecuación 4.3, para definir el flujo de agua que efectivamente llega a los consumidores.

$$V^{pde} = V^{dem} - V^{loss} \quad (4.3)$$

Luego, siguiendo con el desarrollo matemático, R^F también se podrá definir según la Ecuación 4.4 presentada a continuación.

$$R^F = \frac{V^{pde}}{V^{dem}} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

Para que la ecuación anterior quede totalmente descrita se debe exponer la definición de cada uno de sus términos. En primer lugar se precisa la definición del término V^{dem} , que está dado por la Ecuación 4.5.

$$V^{dem} = \sum_{i \in I} DM_i \quad (4.5)$$

Donde,

- I corresponde al conjunto de todos los nodos de consumo de la red.
- DM_i se define como la demanda del consumidor i .

En el caso del término V^{pde} hay que tener en consideración que la red se puede adaptar a la pérdida de flujo ocasionada por el evento disruptivo, usando rutas alternativas dentro del sistema, y respetando la capacidad de cada enlace y nodo correspondiente. Por lo tanto, se debe evaluar esa capacidad de adaptación y se debe incluir en la definición y medición de V^{pde} , tomando nuevos supuestos e introduciendo nuevos parámetros.

Supuestos

- Se debe contar con parámetros para una posible capacidad adicional de las PTAP, y nodos de distribución, es decir, todos aquellos nodos encargados de abastecer a los consumidores desde la fuente hasta ellos mismos. Este parámetro se representará por el término C^{disp} y puede tomar un valor diferente dependiendo de las características de los nodos mencionados. En particular, la capacidad adicional en las PTAP se puede abordar mediante un factor. Por ejemplo, se puede afirmar que la $PTAP_k$ tiene una capacidad máxima por sobre el flujo que trata actualmente de un 10 %.
- Para los demás participantes de la red como nodos de consumo y las plantas de tratamiento de aguas servidas e industriales no se fija una capacidad máxima superior al flujo de entrada previo evento disruptivo. Esto porque, haciendo un nexo con la realidad, se asume que los usuarios no deberían consumir más que su demanda real. En otras palabras, la red no hará que un consumidor aumente su gasto solo para suplir la “demanda” de las plantas de tratamiento. Bajo el enfoque anterior se debe recalcar que se asume que el flujo que reciben los consumidores post evento disruptivo será siempre menor o igual a su demanda.

Con respecto a los parámetros que se deben tener en consideración, en primer lugar se define el conjunto OUT_k como los nodos que reciben flujo de $PTAP_k$ o nodo k , el cual representa a una planta directamente afectada por la reducción del flujo de alimentación como consecuencia de su vulnerabilidad al cambio climático. Esta disminución en el flujo se representará por el parámetro $\alpha_k \in [0, 1]$ (igual a la vulnerabilidad del nodo de alimentación), así los elementos antes mencionados se ejemplifican en la Figura 4.1 a continuación.

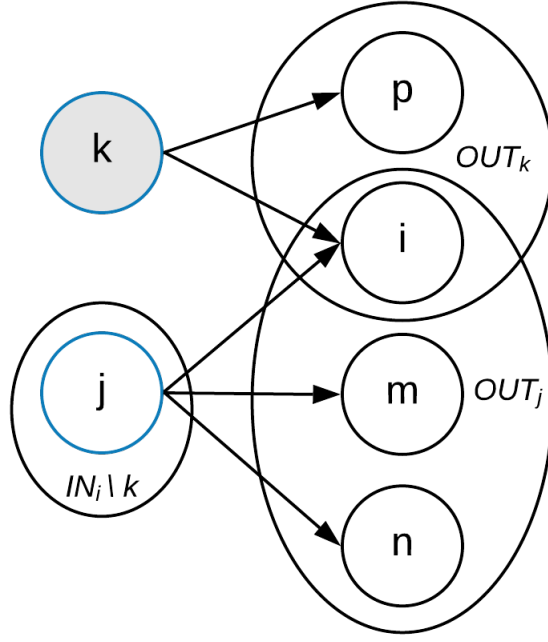


Figura 4.1: Representación del subconjunto OUT_k . Elaboración propia.

Luego se tiene un nodo $i \in OUT_k$ y un nodo $j \in IN_i \setminus k$, donde el conjunto $IN_i \setminus k$ representa a las PTAPs que no se encuentran afectadas por el evento disruptivo (ver Figura 4.1). Entonces, con IN_i correspondiente al conjunto de nodos que alimentan al nodo i , se debe calcular la capacidad disponible de salida del nodo o planta j (C_j^{OUT}) como se indica en la Ecuación 4.6. Cabe destacar que este desarrollo matemático se basa en la construcción del *Índice de adaptabilidad de flujo* presentado por Valenzuela et al. [15].

$$C_j^{OUT} = C_j^{OUT,max} - \sum_{m \in OUT_j} F_{j,m}^{pde} \quad (4.6)$$

Donde,

- $C_j^{OUT,max}$ representa la capacidad máxima de tratamiento de la planta j que estaría alimentada por una fuente no vulnerable.
- $\sum_{m \in OUT_j} F_{j,m}^{pde}$ corresponde a la suma de los flujos de salida de la planta j . Estos flujos post evento disruptivo serán igual a los flujos previo al evento ya que j es no vulnerable y por tanto no ve afectada.

Por consiguiente, la capacidad de tratamiento o abastecimiento disponible para $i \in OUT_k$ se define según la Ecuación 4.7, bajo la posibilidad de que exista más de una planta j con posibilidad de abastecer al nodo i previo al evento disruptivo.

$$C_i^{disp.} = \sum_{j \in IN_i \setminus k} C_j^{OUT} \quad (4.7)$$

En consecuencia, la pérdida real de flujo en el nodo i se define por la Ecuación 4.8, donde F_{ki}^{orig} representa el flujo de agua del nodo k al nodo i , previo al evento disruptivo, y α_k la vulnerabilidad del nodo k (y por ende el porcentaje de pérdida de función). A diferencia del trabajo de Valenzuela et al. [15], donde se evalúa una pérdida de función total con $\alpha_k = 0$,

en este estudio se buscan evaluar fallas parciales de los nodos según su vulnerabilidad.

$$\Gamma_i = \max \{ 0, \alpha_k \cdot F_{k,i}^{orig} - C_i^{disp.} \} \quad (4.8)$$

La pérdida de flujo Γ_i tomará el valor de 0 si la capacidad disponible de la red es mayor que el flujo desabastecido debido al evento disruptivo ($\alpha_k \cdot F_{k,i}^{orig}$), y tomará el valor del flujo que no puede enrutarse cuando la capacidad es menor.

Con la información de Γ_i se deben realizar nuevos balances de masa restando la pérdida de flujo en el nodo $i \in OUT_k$, tal como se ejemplifica en la Ecuación 4.9. Se enfatiza que, en adelante, el término ‘orig’ hace referencia a los flujos originales o previos al evento disruptivo y ‘pde’ corresponde a los flujos post evento.

$$\sum_{j \in IN_i} F_{j,i}^{orig} - \Gamma_i = \sum_{j \in IN_i} F_{j,i}^{pde} \quad (4.9)$$

Finalmente se mide la suma total del flujo que llega a cada nodo de consumo, V^{pde} , mediante la Ecuación 4.10, obteniendo así el término faltante de la Ecuación 4.4 correspondiente a la definición del subíndice de funcionalidad de la red.

$$\boxed{V^{pde} = \sum_{i \in I} \sum_{h \in IN_i} F_{h,i}^{pde}} \quad (4.10)$$

Tal que,

- I corresponde al conjunto de todos los nodos de consumo en la red.
- IN_i corresponde al conjunto de nodos dentro de la red que alimentan al nodo i .
- $F_{h,i}^{pde}$ es el flujo de agua que se dirige desde h hacia i , con $h \in IN_i$.

4.2.1.2. Caso particular: sin adaptabilidad de la red

Se destaca que se puede hacer una distinción en el cálculo del subíndice considerando que la red no se adapta a la pérdida de funcionalidad usando posibles rutas alternativas, es decir, los flujos perdidos no podrían ser enrutados. Lo anterior haría variar el término V^{pde} de la Ecuación 4.4 del subíndice de funcionalidad. Luego, se define dicho término para este caso particular como $V_{s/a}^{pde}$, correspondiente al flujo total que reciben los consumidores cuando el sistema no se adapta (s/a) y por ende la falla parcial o total se propaga en el sistema.

Supuestos

- En este caso las PTAP no tendrían capacidad adicional, y por esa razón no podrían enrutar flujos perdidos. Es decir, el término C_i^{disp} será igual a 0. Luego, Γ_i quedaría definido por la Ecuación 4.11 a continuación.

$$\Gamma_i = \max \{ 0, \alpha_k \cdot F_{k,i}^{orig} \} \quad (4.11)$$

- Debido a la disminución en el flujo de abastecimiento de las fuentes de agua vulnerables, se tendrá un nuevo flujo de salida de cada fuente y con ello se deberán realizar nuevos

balances de masa.

Por lo tanto, se mide el flujo que llega a cada nodo de consumo bajo este nuevo escenario. Luego $V_{s/a}^{pde}$ queda dado por la Ecuación 4.12.

$$V_{s/a}^{pde} = \sum_{i \in I} \sum_{h \in IN_i} F_{h,i}^{pde} \quad (4.12)$$

Donde,

- I corresponde al conjunto de todos los nodos de consumo en la red.
- IN_i corresponde al conjunto de nodos dentro de la red que alimentan al nodo i .
- $F_{h,i}^{pde}$ es el flujo de agua que se dirige desde h hacia i , con $h \in IN_i$.

En resumen, se tiene que el subíndice de funcionalidad dependerá del flujo total de agua demandada, y el flujo de agua que se alimenta a todos los usuarios luego del evento disruptivo. Si bien se puede analizar la red en su totalidad tal como se presenta en las subsecciones anteriores, esta medición puede enfocarse en analizar la resiliencia de cada grupo de consumidores, tal como se muestra en el siguiente apartado.

4.2.1.3. Subíndice de funcionalidad de cada grupo de consumidores

El subíndice de funcionalidad se puede definir también para cada grupo específico de consumidores, utilizando el mismo procedimiento que se emplea para establecer la resiliencia funcional de la red, pero con ciertas variaciones que se muestran inmediatamente.

La Ecuación 4.2, se debe redefinir considerando a C_i como un tipo de consumidores. Recordar que los consumidores se clasifican por su rubro en: consumo residencial, comercial, industrial, de riego para la agricultura y riego de parques urbanos. Por lo tanto, el subíndice de funcionalidad para el grupo de consumidores C_i quedaría definido por la Ecuación 4.13.

$$R_{C_i}^F = \frac{V_{C_i}^{dem} - V_{C_i}^{loss}}{V_{C_i}^{dem}} \cdot 100 \% \quad (4.13)$$

Donde,

- $V_{C_i}^{dem}$ corresponde al flujo de agua con el que se satisface la demanda de los consumidores C_i .
- $V_{C_i}^{loss}$ el flujo de agua que no se abastece a los consumidores C_i debido a la ocurrencia del evento disruptivo.

A partir de los anterior, el término $V_{C_i}^{pde}$ quedaría definido por la Ecuación 4.14. Luego $R_{C_i}^F$ quedaría representado por la Ecuación 4.15.

$$V_{C_i}^{pde} = V_{C_i}^{dem} - V_{C_i}^{loss} \quad (4.14)$$

$$R_{C_i}^F = \frac{V_{C_i}^{pde}}{V_{C_i}^{dem}} \cdot 100 \% \quad (4.15)$$

A continuación se precisa la definición del término $V_{C_i}^{dem}$, que esta dado en este caso por la Ecuación 4.16.

$$V_{C_i}^{dem} = \sum_{j \in C_i} DM_j \quad (4.16)$$

Donde,

- C_i corresponde al conjunto de los nodos de consumo del tipo i .
- DM_j se define como la demanda de un consumidor $j \in C_i$.

Finalmente se mide el flujo que llega a cada nodo de consumo del conjunto de consumidores C_i , mediante la Ecuación 4.17 que se presenta a continuación.

$$V_{C_i}^{pde} = \sum_{j \in C_i} \sum_{h \in IN_j} F_{h,j}^{pde} \quad (4.17)$$

Tal que,

- $C_i \subset I$ corresponde al conjunto de los nodos de consumo del tipo C_i .
- IN_j corresponde al conjunto de nodos dentro de la red que alimentan al nodo j .
- $F_{h,j}^{pde}$ es el flujo de agua que se dirige desde h hacia j , con $h \in IN_j$.

Finalmente, se destaca que para estudiar este caso particular se utilizan las mismas ecuaciones que para evaluar el subíndice de funcionalidad de la red en su totalidad, pero acotando el conjunto de medición a un grupo específico de consumidores.

4.2.1.4. Limitaciones

A continuación se presentan aquellos aspectos de la definición anterior que pueden significar una limitación de la aplicación del subíndice de funcionalidad

1. Con el planteamiento anterior se ignora la capacidad de abastecimiento de las fuentes agua que no son vulnerables a los efectos del cambio climático, es decir, se asume que su capacidad de abastecimiento no tiene un límite definido.
2. El desarrollo matemático no considera la posibilidad de que dos nodos afectados i y m puedan estar conectados a una planta con capacidad de enrutar j . Es decir, para tener en consideración esta característica de la red, la capacidad disponible de j se debería dividir proporcionalmente entre i y m de acuerdo al flujo tratado por ambas plantas.

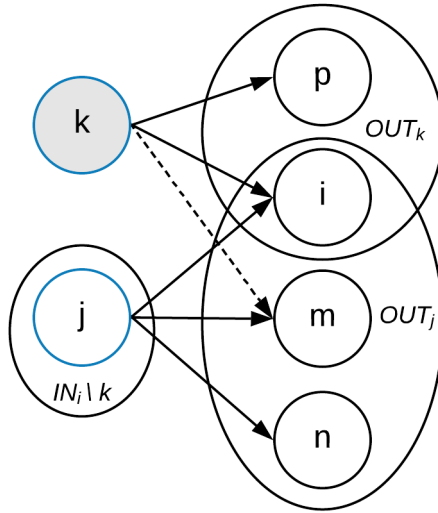


Figura 4.2: Representación de una posible limitación en la aplicación del subíndice de funcionalidad. Elaboración propia.

3. No se considera una posible jerarquización de los nodos de consumo, es decir, no se privilegia satisfacer la demanda de ningún tipo de consumidor en particular.

Se tiene que en la realidad los tomadores de decisiones podrían querer satisfacer la demanda de un tipo de consumidor en primer lugar, como por ejemplo los nodos de consumo domiciliario. Para abarcar este problema es que se define el subíndice de funcionalidad para cada grupo de consumidor $R_{C_i}^F$ como se muestra en la subsección anterior. Esto permitirá que en una aplicación futura en problemas de optimización de redes hídricas, se puede tener la opción de maximizar $R_{C_i}^F$ por sobre R_F .

4.2.2. Subíndice de vulnerabilidad topológica

En primer lugar, la topología de una red hace referencia a la configuración de la misma, es decir, a la disposición de sus nodos y sus líneas de conexión. En particular, en este trabajo se incorporó el concepto de vulnerabilidad de los distintos nodos de abastecimiento de la red debido a las consecuencias del cambio climático en la misma [3, 33].

El subíndice de vulnerabilidad topológica busca medir la dependencia de los nodos de consumo de la red, de nodos de abastecimiento vulnerables o no vulnerables al cambio climático. Por lo tanto, como se vio en secciones anteriores, la red será 0% resiliente desde el punto de vista topológico si todos sus nodos de abastecimiento son completamente vulnerables al cambio climático. En cambio, será 100% topológicamente resiliente si depende en su totalidad de nodos no vulnerables.

La dependencia anterior se verá reflejada a través de la evaluación de las conexiones de entrada a cada nodo de consumo, y es debido a ese estudio de las conexiones y sus características que a este subíndice se le llame subíndice de vulnerabilidad topológica. Además, se evalúa la resiliencia en base a los nodos de consumo ya que estos nodos son el foco del índice de resiliencia propuesto, debido a la importancia de asegurar la satisfacción de su demanda.

Sumado a lo anterior, se puede afirmar que es necesario incluir un subíndice de vulnerabilidad topológica en la formulación del índice de resiliencia general del sistema ya que se tiene la necesidad de evaluar, no sólo la funcionalidad del sistema ante posibles fallas, sino también su configuración y la influencia de los nodos de abastecimiento vulnerables y no vulnerables en el sistema, específicamente en los consumidores.

En esta sección se presenta el subíndice de vulnerabilidad topológica, incluyendo los supuestos y consideraciones generales en su construcción. A continuación se presenta del desarrollo matemático mediante el cual se define el subíndice, los parámetros necesarios para su cálculo y se explicitan los supuestos tomados.

4.2.2.1. Representación matemática

Primeramente el subíndice de vulnerabilidad topológica de la red hídrica de una ciudad (R^{VT}) quedará definido según la Ecuación 4.18, presentada a continuación.

$$R^{VT} = \left(\frac{1}{NC} \cdot \sum_{i \in I} R_i^{VT} \right) \cdot 100 \% \quad (4.18)$$

Donde,

- I corresponde al conjunto de consumidores de la red.
- R_i^{VT} el subíndice de vulnerabilidad topológica calculado para el nodo i , con $R_i^{VT} \in [0, 1]$.
- NC es el número total de consumidores que forman parte de la red.

Cabe destacar que NC se puede definir también como la cardinalidad del conjunto I o $|I|$, luego la Ecuación 4.18 se puede redefinir según la Ecuación 4.19. Se tiene, por tanto que R^{VT} corresponde un promedio simple de la vulnerabilidad topológica de cada nodo de consumo de la red.

$$R^{VT} = \left(\frac{1}{|I|} \cdot \sum_{i \in I} R_i^{VT} \right) \cdot 100 \% \quad (4.19)$$

Una vez que se tiene definida la fórmula general del subíndice de vulnerabilidad topológica se debe expresar la definición matemática para R_i^{VT} correspondiente a la vulnerabilidad topológica del nodo i , es decir, se evalúa la propagación de la vulnerabilidad en los nodos de consumo. Esta se define mediante la Ecuación 4.20 a continuación.

$$R_i^{VT} = \frac{\sum_{j \in IN_i} (1 - V_j) \cdot X_{j,i}}{\sum_{j \in IN_i} X_{j,i}} \quad (4.20)$$

Tal que,

- IN_i es el conjunto de todas las corrientes de entrada al nodo de consumo i .
- V_j corresponde a la vulnerabilidad del nodo de abastecimiento $j \in IN_i$ con $V_j \in [0, 1]$.
- $X_{j,i}$ representa la existencia del enlace de alimentación del nodo j al nodo de consumo i .

Como se puede apreciar en la definición del subíndice de vulnerabilidad topológica, se evalúa esta propiedad en los nodos de consumo y no en las fuentes de abastecimiento. Esto se realiza con el fin de analizar las características de la red y como estas influyen en una disminución/aumento de la resiliencia del sistema. Por lo anterior, la red puede contar con fuentes de abastecimiento altamente vulnerables, pero si estas tienen influencia en un número menor de nodos de consumo, la resiliencia global del sistema no se va a ver mayormente afectada. Así, se tiene que la definición del subíndice de vulnerabilidad topológica implica que si los nodos de consumo están conectados a nodos de alimentación menos vulnerables, la vulnerabilidad del nodo será menor, y con ello mayor será la resiliencia de la red.

Antes de seguir con el desarrollo del subíndice de vulnerabilidad topológica se deben aclarar algunos conceptos. Se dice que el nodo j representa a un nodo de abastecimiento, estos nodos corresponderán a PTAP, PTAS (con capacidad de tratar el agua hasta la calidad requerida por los consumidores) y nodos de Distribución, es decir, representa todos aquellos nodos que puedan alimentar a los consumidores.

Para definir la vulnerabilidad de cada uno de estos nodos se toman los siguientes supuestos:

- Se fija la vulnerabilidad de las PTAP en base a la vulnerabilidad(es) de la(s) fuente(s) de agua que la alimentan. Cabe recordar que en el caso de estudio de este trabajo la vulnerabilidad será mayor en el caso de fuentes superficiales (directamente afectadas) y nula en el caso de fuentes subterráneas. En la Subsección 2.3.1 se explica este concepto y se justifican los valores utilizados en el caso de estudio (ver Tabla 2.5).
- La vulnerabilidad de todas las PTASs se fija como un parámetro establecido, en base a estudios sobre efectos del cambio climático en una red hídrica [3], quedando fuera de los alcances del presente trabajo de título una posible diferenciación del valor de la vulnerabilidad según la fuente de alimentación de estas instalaciones. De manera general, se tiene que la vulnerabilidad de estas plantas a los eventos extremos de precipitación será mayor que la vulnerabilidad de PTAP abastecidas por fuentes subterránea y menor que la vulnerabilidad de PTAP abastecidas por fuentes superficiales (ver Tabla 2.5).
- Si un nodo de consumo se alimenta directamente desde la fuente tomará el valor de vulnerabilidad de la fuente como la vulnerabilidad del nodo que lo alimenta V_j .
- La vulnerabilidad del o los nodo/s de distribución dependerá de la vulnerabilidad de sus respectivos nodos de alimentación, es decir, para este tipo de nodo la vulnerabilidad se define por la Ecuación 4.21:

$$V_d = \frac{\sum_{k \in IN_d} V_k}{|IN_d|} \quad (4.21)$$

En este caso IN_d corresponde al conjunto de nodos que alimentan al nodo d , y V_k a la vulnerabilidad del nodo $k \in IN_d$, la cual toma valores en $[0, 1]$.

Finalmente, se puede afirmar que la vulnerabilidad asociada a los nodos de abastecimiento se va a transmitir a la red hídrica y con ello a los nodos de consumo mediante las conexiones existentes entre los distintos nodos de la red. En una red hídrica una de las características importantes es la confiabilidad del suministro de agua a los clientes, por eso es que para

evaluar la resiliencia de la red, se mide la vulnerabilidad de los nodos que alimentan a dichos consumidores.

4.2.2.2. Subíndice de vulnerabilidad topológica de cada grupo de consumidores

El subíndice de vulnerabilidad topológica se puede definir para cada grupo específico de consumidores, utilizando la misma Ecuación 4.18 con ciertas variaciones en el conjunto de medición.

Dicha ecuación se debe redefinir considerando a C_i como un tipo de consumidores. Recordar que, en la caracterización de una red hídrica, los consumidores se clasificaron por su rubro en: consumo residencial, comercial, industrial, de riego en la agricultura y en parques urbanos. Por lo tanto, el subíndice de vulnerabilidad topológica para el grupo de consumidores C_i quedaría definido por la Ecuación 4.22.

$$R_{C_i}^{VT} = \left(\frac{1}{|C_i|} \cdot \sum_{k \in C_i} R_k^{VT} \right) \cdot 100 \% \quad (4.22)$$

Donde,

- C_i corresponde al conjunto de consumidores del tipo i en la red.
- R_k^{VT} el subíndice de vulnerabilidad topológica calculado para el nodo $k \in C_i$, con $R_k^{VT} \in [0, 1]$.
- $|C_i|$ es el número de consumidores que forman parte del conjunto C_i .

Siguiendo con el desarrollo, el término R_k^{VT} quedaría definido por la Ecuación 4.23.

$$R_k^{VT} = \frac{\sum_{j \in IN_k} (1 - V_j) \cdot X_{j,k}}{\sum_{j \in IN_k} X_{j,k}} \quad \forall k \in C_i \quad (4.23)$$

Donde,

- IN_k es el conjunto de todas las corrientes de entrada al nodo de consumo $k \in C_i$.
- V_j corresponde a la vulnerabilidad del nodo de abastecimiento $j \in IN_k$, con $V_j \in [0, 1]$
- $X_{j,k}$ representa la existencia del enlace de alimentación del nodo j al nodo de consumo k .

Al igual que con el subíndice de funcionalidad, se define el subíndice de vulnerabilidad topológica para cada grupo de consumidores para dar mayor flexibilidad a los tomadores de decisiones que deseen aumentar la resiliencia de un tipo de consumidores en particular. Esto permitirá que en una aplicación futura en problemas de optimización de redes hídricas, se pueda maximizar un $R_{C_i}^{VT}$ por sobre R_{VT} global.

4.2.2.3. Limitaciones

En la presente subsección se detallan aquellos aspectos de la definición anterior que pueden significar una limitación de la aplicación del subíndice de vulnerabilidad topológica.

Se tiene que para cada nodo de consumo i el subíndice de vulnerabilidad topológica se define como un promedio (ver Ecuación 4.20), considerando la vulnerabilidad de cada uno de sus nodos de alimentación, V_j . La definición de promedios en un problema de optimización lineal, donde $X_{j,i}$ corresponderá a una variable de existencia de la conexión $j - i$, implica transformar el problema en uno no lineal, agregando complejidad al mismo.

Este problema sería no lineal porque, al definir R_i^{VT} como una ecuación en el planteamiento del problema, el término R_i^{VT} correspondiente a una variable continua y $X_{j,i}$ correspondiente a una variable binaria se estarían multiplicando, tal como se muestra en la Ecuación 4.24.

$$R_i^{VT} \cdot \sum_{j \in IN_i} X_{j,i} = \sum_{j \in IN_i} (1 - V_j) \cdot X_{j,i} \quad (4.24)$$

Como R_i^{VT} no depende de la sumatoria en j de la Ecuación 4.24, esta se puede redefinir tal como se muestra en la Ecuación 4.25 siguiente.

$$\sum_{j \in IN_i} R_i^{VT} \cdot X_{j,i} = \sum_{j \in IN_i} (1 - V_j) \cdot X_{j,i} \quad (4.25)$$

Para resolver el problema de la no linealidad del subíndice de vulnerabilidad topológica, se puede aplicar un método de linealización ampliamente utilizado en ecuaciones donde se multiplica una variable continua y una variable binaria, conocido como el método de la “*big M*”.

Bajo este método se le asigna un límite superior finito a la variable R_i^{VT} denotado por M . Luego se introduce una nueva variable $RX_{j,i}$ que deberá tomar el mismo valor que el producto entre R_i^{VT} y $X_{j,i}$ es decir:

$$RX_{j,i} = R_i^{VT} \cdot X_{j,i} \quad (4.26)$$

A partir de esta definición es que en el planteamiento del problema de optimización la Ecuación 4.25 quedaría expresada por la Ecuación 4.27 la cual sería lineal, ya que V_j corresponde a un parámetro conocido.

$$\sum_{j \in IN_i} RX_{j,i} = \sum_{j \in IN_i} (1 - V_j) \cdot X_{j,i} \quad (4.27)$$

Se debe notar que el producto representado por $RX_{j,i}$ será igual a cero si $X_{j,i} = 0$, pero a priori R_i^{VT} podría tomar cualquier valor entre 0 y M si $X_{j,i} = 1$. Por lo tanto para aplicar el método de la “*big M*” se deben agregar restricciones adicionales al problema con el fin de que las variables antes mencionadas queden acotadas y tomen el valor deseado en la optimización del problema.

El paso siguiente es acotar R_i^{VT} por M , pero según la definición del subíndice de vulnerabilidad topológica R_i^{VT} solo puede tomar valores entre 0 y 1, por lo tanto, la “*big M*” en este caso será 1.

$$M = 1 \quad (4.28)$$

Luego, las ecuación siguientes serán aquellas restricciones adicionales que se agregan al problema para que $RX_{j,i}$ sea igual a R_i^{VT} en el caso en que $X_{j,i} = 1$.

$$RX_{j,i} \leq M \cdot X_{j,i} \quad (4.29)$$

$$RX_{j,i} \leq R_i^{VT} \quad (4.30)$$

$$RX_{j,i} \geq R_i^{VT} - M \cdot (1 - X_{j,i}) \quad (4.31)$$

Donde,

- $RX_{j,i} \in [0, 1]$
- $R_i^{VT} \in [0, 1]$
- $X_{j,i} \in \{0, 1\}$

En el caso en que $X_{j,i} = 0$, por definición $RX_{j,i}$ también sería igual a 0. Luego se tiene que, según el planteamiento de las ecuaciones, R_i^{VT} quedaría acotado $0 \leq R_i^{VT} \leq 1$. Esto se explica porque, según la Ecuación 4.32 (resultado de igualar la Ecuación 4.24 y 4.27), R_i^{VT} depende de todas las conexiones que posee el nodo, y este nodo de consumo por definición debe poseer al menos una conexión para que forme parte de la red, por lo tanto necesariamente $RX_{j,i} \leq R_i^{VT}$.

$$\sum_{j \in IN_i} RX_{j,i} = \sum_{j \in IN_i} R_i^{VT} \cdot X_{j,i} \quad (4.32)$$

Finalmente, se puede afirmar que el método anterior permitiría linealizar el subíndice de vulnerabilidad topológica y así facilitar su aplicación futura en problemas de optimización. Además, se puede declarar que para definir un subíndice que sea lineal desde su base se tendría que fijar el denominador de la Ecuación 4.20 como un parámetro. Como a priori, en un problema de optimización se desconocerían el número de conexiones de entrada a cada nodo de consumo, se cree que fijar este parámetro podría agregar incertidumbre al subíndice. De todas formas no se descarta esta posible modificación en redes donde el número de conexiones de entrada a cada nodo deba ser fijo.

Capítulo 5

Implementación en el caso de estudio

En este capítulo que exponen las principales características de la red hídrica del Gran Santiago, en base a la información entregada por el Proyecto Fondecyt “*Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation*”, y junto con ello, se presenta la implementación del índice de resiliencia en cada configuración a evaluar.

La ciudad de Santiago, capital de Chile, es el centro político, económico e institucional del país. Santiago se ubica en la cuenca hidrográfica del río Maipo, donde las principales fuentes de agua superficial son los ríos Maipo y Mapocho, además esta es una zona de estrés hídrico, con un déficit regional promedio de 11,4% [8].

Del flujo total de agua que se extrae desde las fuentes, el 81% corresponde a fuentes superficiales y el 19% a fuentes subterráneas. Por otro lado, de la distribución del consumo según los diferentes usuarios se tiene que el 49% corresponde al consumo residencial, 35% al riego agrícola, 9% al consumo industrial, 4% al riego de parques urbanos, y 3% al consumo comercial. El detalle de cada uno de estos consumos se encuentra en la Tabla A.1 en el Anexo A [8].

En el Proyecto, el sistema de tratamiento de agua actual del Gran Santiago se representa por una Planta de Tratamiento de Agua Potable grande y una pequeña, y también por una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas grande y una pequeña. Esto se realiza a modo de simplificar el sistema de red, ya que en la realidad el sistema de agua del Gran Santiago está compuesto por 30 PTAP y 10 PTAS. Además la ciudad se dividió en cuatro áreas: noreste (o SL), noroeste (o GF), sureste (o RC) y suroeste (o HF) [8].

Un aspecto a destacar es que en la configuración actual de la red no hay reciclaje de agua, es decir, todas las plantas de tratamiento de aguas residuales descargan sus efluentes en cursos naturales de agua, tal como se puede observar en la Figura 5.1, la cual corresponde a la representación gráfica del sistema actual.

Para implementar el índice de resiliencia propuesto en la configuración actual de la red, se selecciona Excel como la herramienta a utilizar. En dicho documento se representa el sistema de red con sus respectivas dependencias, se fijan los parámetros del problema (la vulnerabilidad de cada fuente y el parámetro de importancia de cada subíndice β) y se verifica

el cumplimiento del balance de masa, considerando la pérdida de cada nodo (ver Tabla A.2), tal como se realiza en el Proyecto (*'Sink'* en la Figura 5.1 representa esa pérdida).

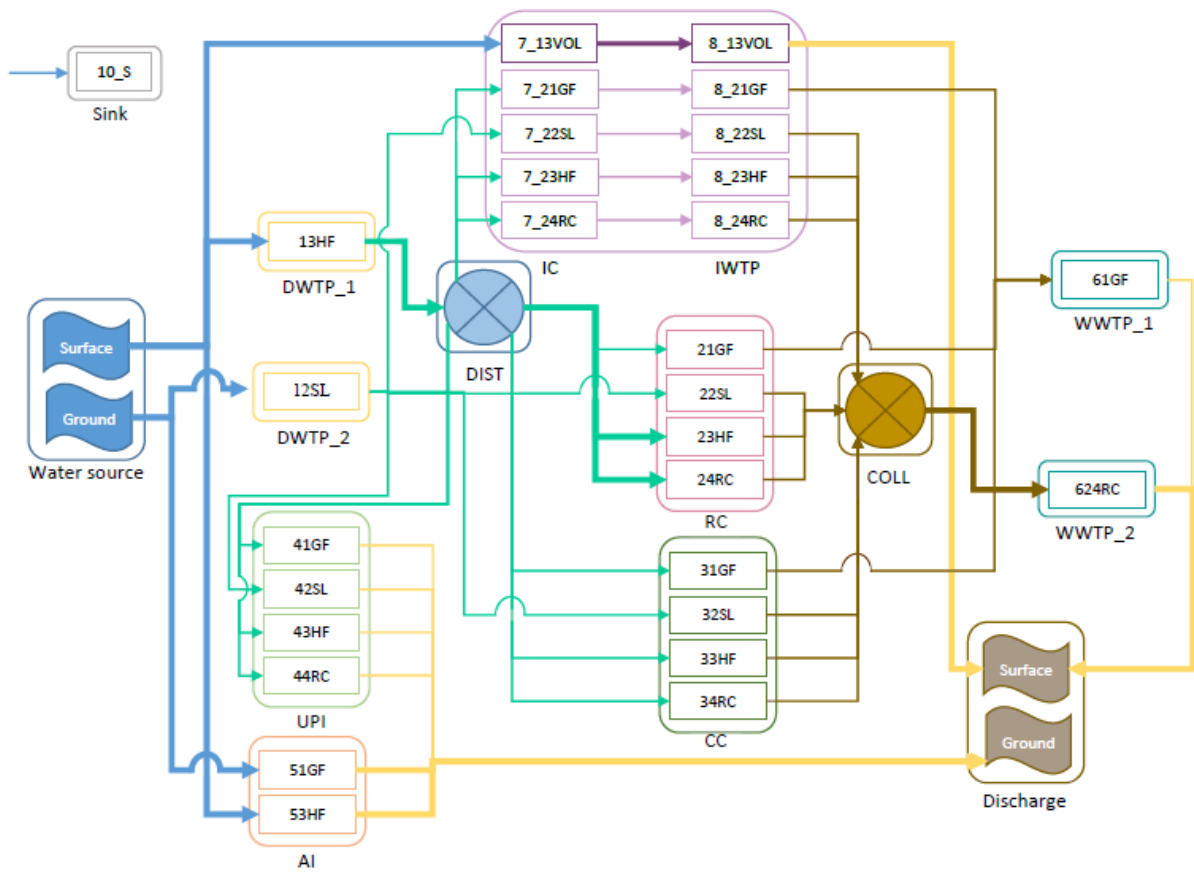


Figura 5.1: Configuración de la red hídrica actual del Gran Santiago [9].

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

Cuando se habla de dependencias se hace referencia a que la red se configura de tal forma que la entrada de cada nodo corresponda a la salida de su respectivo nodo de alimentación y que las corrientes que salen directamente desde las fuentes estarán afectas a la vulnerabilidad de la misma, pudiendo reducirse su flujo. Los resultados de este análisis se presentan en el Capítulo 6: Resultados.

Para obtener la configuración de la red optimizada se resuelve un problema multiobjetivo de programación no lineal entera y mixta (en inglés *Mixed Integer NonLinear Programming, MINLP*), basado en la superestructura de la Figura 2.1, cuyo objetivo es minimizar los impactos ambientales y económicos de la red. Dicho modelo consta de un conjunto de restricciones de balances de masa en los nodos de las plantas de tratamiento, nodos de distribución y recolección y nodos de consumo. También incluye restricciones que permiten satisfacer la demanda de cada nodo de consumo, ecuaciones que definen la capacidad de tratamiento para plantas nuevas, existentes y modificadas, y finalmente, incluye restricciones adicionales para dar una relación lógica de existencia para las plantas de tratamiento.

La configuración de red que se obtiene de la resolución del problema de optimización anterior se muestra en la Figura 5.2. Se destaca que se incorporan nuevas PTAS, y que en este caso, si hay reciclaje de agua, ya que se cuenta con PTAS capaces de tratar el agua hasta el nivel de calidad requerido por los consumidores, pudiendo alimentar así a ciertos nodos de consumo.

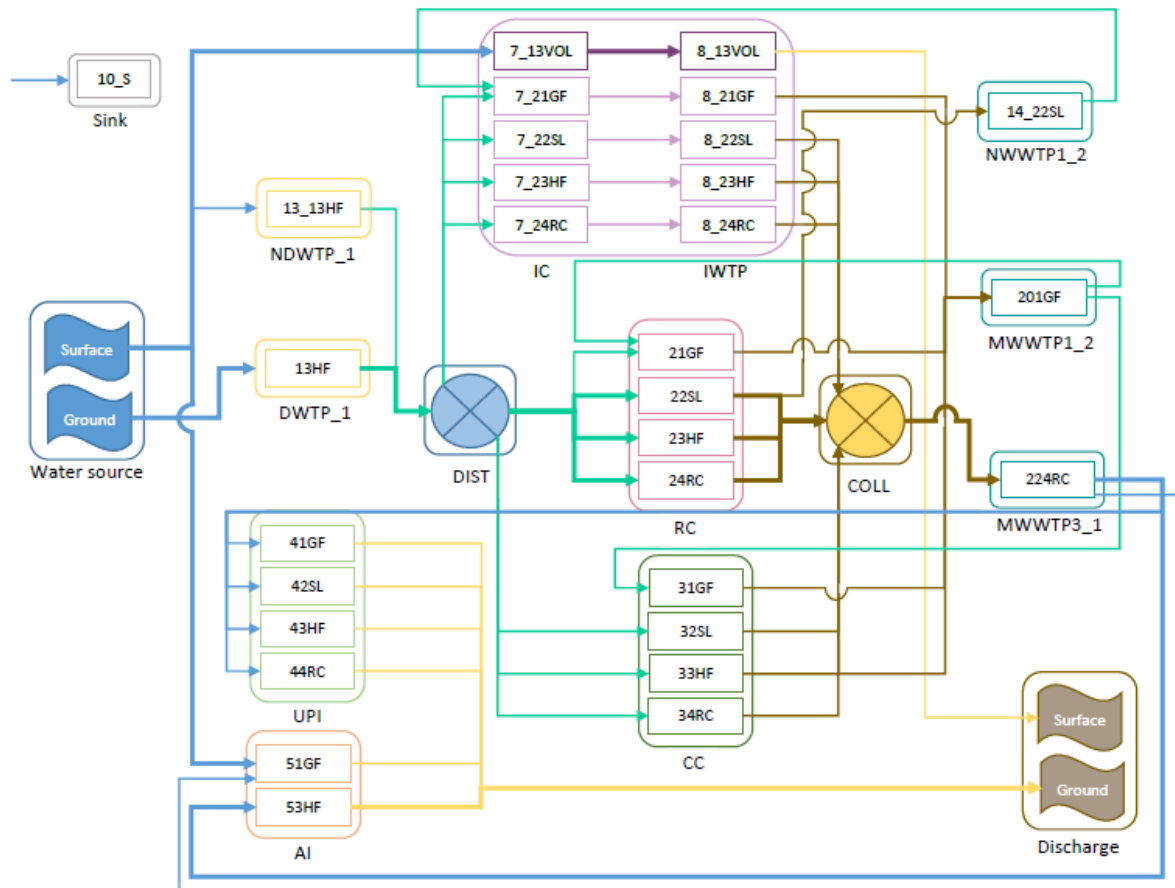


Figura 5.2: Configuración de la red hídrica optimizada del Gran Santiago [9].

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

Para implementar el índice de resiliencia en la red optimizada del Gran Santiago, se decide ocupar la misma plataforma de optimización en la que se resuelve el problema del Proyecto, correspondiente a GAMS. En el mismo documento en el que se plantea el problema de optimización se introduce un nuevo problema (posterior al *Solve* del primero) en el que se agregan nuevos parámetros, variables, ecuaciones, y donde se toman como parámetros los resultados obtenidos de la optimización de la red del Gran Santiago.

Siguiendo la estructura del problema de optimización planteado para calcular la resiliencia de la red, a continuación se exponen los principales elementos de este planteamiento.

Parámetros

Se fija el porcentaje de importancia de cada subíndice en 50% para la mayoría de los

resultados expuestos en el siguiente Capítulo. Sin embargo, para estudiar la relevancia de este valor en el índice de resiliencia global se analizarán también los casos con $\beta = 25\%$ y $\beta = 75\%$, a modo de contar una análisis de sensibilidad para este parámetro.

$$\beta = 0,5 \quad (5.1)$$

Se define la vulnerabilidad de las fuentes de agua, y además la vulnerabilidad de las PTAS, con los siguientes valores. La justificación de esta elección se encuentra en la Subsección 2.3.1 junto a la Tabla 2.5.

$$V_{fuentes} = \begin{cases} 0,4 & \text{para fuentes superficiales (Surface)} \\ 0 & \text{para fuentes subterráneas (Ground)} \\ 0,2 & \text{para las PTAS en general (WWTP)} \end{cases} \quad (5.2)$$

Se define como cambian los flujos de salida de la fuente en base a la vulnerabilidad de las mismas.

$$F_{k,i}^{pde} = F_{k,i}^{orig} \cdot (1 - V_k) \quad \forall k \in Fuentes\ de\ agua \quad (5.3)$$

Tal que $F_{k,i}^{pde}$ corresponde al flujo del nodo fuente k al nodo i , posterior al evento disruptivo, $F_{k,i}^{orig}$ corresponde al flujo original y V_k representa la vulnerabilidad del nodo k .

Luego en esta aplicación se fijan parámetros de existencia para cada flujo dentro de la red.

$$EF_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } F_{i,j} > 0 \\ 0 & \text{si } F_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Se incluye un parámetro auxiliar que permite sumar las conexiones entrantes a cada nodo de consumo, utilizando el parámetro de existencia anterior.

$$EXIS_i = \sum_{k \in IN_i} EF_{k,i} \quad \forall i \in I \quad (5.5)$$

Tal que k pertenece al conjunto de nodos que alimentan al nodo de consumo i (IN_i), con I correspondiente al conjunto de consumidores.

Para simplificar la aplicación del índice de resiliencia se define como parámetro la vulnerabilidad de las PTAP y nodo de distribución, en base a la vulnerabilidad de sus respectivos nodos de alimentación, tal como se define anteriormente en la Ecuación 4.21. Para evitar la indeterminación de este promedio la vulnerabilidad de estos nodos se define como:

$$V_j = \begin{cases} (\sum_{k \in IN_j} EF_{k,j} \cdot V_k) / \sum EF_{k,j} & \text{si } \sum_{k \in IN_j} EF_{k,j} > 0 \\ 0 & \text{si } EF_{k,j} = 0 \end{cases} \quad \forall j \in J \cup D \quad (5.6)$$

Donde k pertenece al conjunto de nodos que alimentan al nodo j (IN_j), con j perteneciente al conjunto de PTAP, J , o al conjunto de nodos de distribución, D .

Se define un parámetro que servirá para posteriormente fijar una cota inferior en la alimentación de agua a cada nodo de consumo, con el fin de que todos reciban al menos un cierto porcentaje de agua con respecto al flujo original. Este parámetro se define en la Ecuación 5.7, donde K corresponde al conjunto de las fuentes de agua.

$$Equit = 1 - \max(V(K)) \quad (5.7)$$

Variables

- Se definen las variables de resiliencia, con R como el índice de resiliencia global, R^F como el subíndice de funcionalidad y R^{VT} como el subíndice de vulnerabilidad topológica. Además, tanto para índice como para subíndices, se calcula su valor para cada grupo de consumidor agregándose R_{C_i} , $R_{C_i}^F$ y $R_{C_i}^{VT}$ a las variables.
- Se agrega una variable auxiliar para la implementar la definición del subíndice de vulnerabilidad topológica que se denotará por NEX_i .
- Se agrega la variable DDA_i^{pde} que sumará los flujos que llegan a los nodos de consumo post evento disruptivo.
- Se definen variables de flujo para representar las corrientes post eventos disruptivo, las que se denotan por $F_{k,j}^{pde}$.

Ecuaciones

Se fijan cotas superiores para las variables de resiliencia.

$$Resiliencia \leq 1 \quad \forall Resiliencia = \begin{cases} R \vee R^F \vee R^{VT} \\ R_{C_i} \vee R_{C_i}^F \vee R_{C_i}^{VT} \end{cases} \quad (5.8)$$

Se acota la variable asociada al flujo que reciben los consumidores DDA_i^{pde} .

$$DDA_i \cdot Equit \leq DDA_i^{pde} \leq DDA_i \quad \forall i \in I \quad (5.9)$$

Donde DDA_i corresponde a la demanda total del nodo i , perteneciente al conjunto de nodos de consumo I . Por otro lado, el parámetro $Equit$ permite agregar como cota inferior un porcentaje de la demanda original, en función de las vulnerabilidades que enfrenta el sistema.

Luego se definen los balances de masa para cada nodo dentro de la red en base a las nuevas variables de flujo, tal como están definidos en el problema original.

$$\sum_{k \in IN_n} F_{k,n}^{pde} = \sum_{j \in OUT_n} F_{n,j}^{pde} \quad \forall n \in N \quad (5.10)$$

Tal que IN_n es el conjunto de nodos que alimentan a n y OUT_n el conjunto de nodos que se alimentan de n , con N como el conjunto de todos los nodos de la red.

A continuación se acota cada variable nueva de flujo, por el flujo original del problema.

$$F_{j,k}^{pde} \leq F_{j,k}^{orig} \quad \forall j, k \in N \quad (5.11)$$

Luego se calcula la variable DDA_i^{pde} ya mencionada mediante la Ecuación 5.12.

$$DDA_i^{pde} = \sum_{j \in IN_i} F_{j,i}^{pde} \quad \forall i \in I \quad (5.12)$$

Por consiguiente se define R^F de la red y también para cada grupo de consumidores, tal como se muestra a continuación.

$$R^F \cdot \sum_{i \in I} DDA_i = \sum_{i \in I} DDA_i^{pde} \quad (5.13)$$

$$R_{C_i}^F \cdot \sum_{i \in C_i} DDA_i = \sum_{i \in C_i} DDA_i^{pde} \quad \forall C_i \subset I \quad (5.14)$$

Anteriormente se definió la variable auxiliar NEX_i que busca representar el numerador de la Ecuación 4.20 donde se define el subíndice de vulnerabilidad topológica, tal como sigue.

$$NEX_i = \sum_{j \in IN_i} EF_{j,i} \cdot (1 - V_k) \quad \forall i \in I \quad (5.15)$$

Luego se precisa el cálculo de R^{VT} para la red y también para cada nodo y grupo de consumidores, utilizando el parámetro auxiliar $EXIS_i$ definido en la Ecuación 5.5.

$$R_i^{VT} \cdot EXIS_i = NEX_i \quad \forall i \in I \quad (5.16)$$

$$R_{C_i}^{VT} \cdot \text{card}(C_i) = \sum_{i \in C_i} R_i^{VT} \quad \forall C_i \subset I \quad (5.17)$$

$$R^{VT} \cdot \text{card}(I) = \sum_{i \in I} R_i^{VT} \quad (5.18)$$

Por último, se aplica la Ecuación 4.1 de definición del índice de resiliencia para la red general y también por tipo de consumidor. Cabe señalar que se resuelve este problema buscando maximizar la resiliencia global de red R .

Para evaluar el sistema considerando la capacidad adicional de la PTAP no afectada por la vulnerabilidad de la fuente, la red optimizada se representa en un documento Excel, tal como se ejecuta para la configuración de la red actual del Gran Santiago. Esto se realiza determinar del porcentaje necesario de capacidad adicional, que cubre la pérdida de flujo debido a la vulnerabilidad de la fuente superficial.

En la representación de la red optimizada en el documento Excel se considera que el flujo que sale de la PTAP que no es vulnerable al evento extremo de precipitación (con alimentación de la fuente subterránea) puede aumentarse en el porcentaje antes mencionado. Cabe destacar

que mediante un proceso iterativo se determina que este porcentaje corresponde a un 0,45 %, es decir, si la planta cuenta con mayor capacidad adicional, solo se requiere de un 0,45 % de esta capacidad para enrutar los flujos perdidos debido al evento disruptivo.

Finalmente, los resultados de la implementación del índice de resiliencia en la red actual y optimizada se presentan en el capítulo siguiente.

Capítulo 6

Resultados

En el presente capítulo se exponen los principales resultados obtenidos de la aplicación del índice de resiliencia en el caso de estudio: red hídrica del Gran Santiago. En primer lugar se presentan los resultados para la configuración actual de la red hídrica, para luego pasar a mostrar los resultados de la configuración optimizada de la red. De esta última se analizan dos casos particulares: el primero considera la adaptabilidad de la red al evento disruptivo y el segundo no considera esta característica, para esto se varía la capacidad disponible de los nodos para enrutar el flujo que no se produce debido al evento disruptivo. Sumado a lo anterior, se realiza un análisis y discusión de los resultados presentados en cada caso, para luego finalizar con una sección de comparación de los mismos.

Cabe destacar que el escenario de vulnerabilidad al cambio climático que se analiza en este caso corresponde a un 40 % de vulnerabilidad de la fuente superficial, un 0 % para la fuente subterránea, y un 20 % para las plantas de tratamiento de aguas servidas con capacidad de recircular agua, la justificación de esta elección se encuentra en la Subsección 2.3.1 junto a la Tabla 2.5. Sin embargo, para mostrar la dependencia del índice respecto a estos parámetros, se incluye un análisis de la resiliencia de la red actual y optimizada considerando un escenario positivo en que la vulnerabilidad sea menor y un escenario negativo en que todas las fuentes sean más vulnerables. Luego, se discuten los resultados obtenidos.

Adicionalmente se incluye un análisis de la resiliencia de las dos configuraciones anteriores variando el porcentaje de importancia de cada subíndice en el índice de resiliencia global, ya que para los resultados anteriormente descritos se considera que ambos subíndices tienen igual importancia. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos y se discute sobre la sensibilidad del índice de resiliencia ante la elección de este parámetro.

6.1. Red hídrica actual del Gran Santiago

La configuración de la red hídrica actual se expone en el capítulo anterior, representándose a través de la Figura 5.1. Aplicando el índice de resiliencia en esta red se obtienen los resultados expuestos en la Figura 6.1, donde se puede observar el valor del índice de resiliencia para cada grupo de consumidores y para la red en su totalidad, correspondiente a un 71 %.

Con el propósito de detallar el resultado anterior, se presenta la Figura 6.2 que expone el valor de cada subíndice de resiliencia para la red y para cada grupo de consumidores. Se

obtiene que el subíndice de funcionalidad de la red hídrica actual alcanza un valor de 72 % y el subíndice de vulnerabilidad topológica un 71 %.

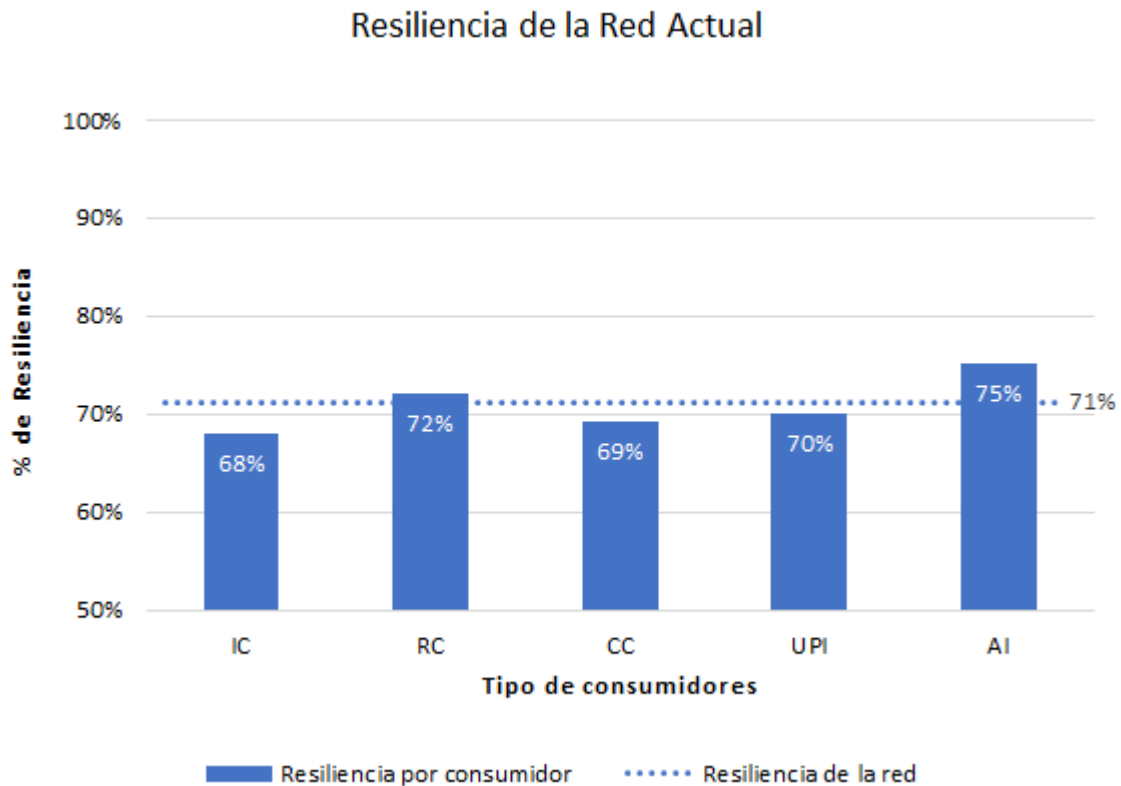


Figura 6.1: Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

En la Figura 6.1 se puede observar que el grupo de consumo de riego para la agricultura (*AI*) es el más resiliente con un 75 %; por otro lado, el grupo de consumo industrial (*IC*) es el menos resiliente con un 68 %. Esto se explica en parte por el valor del subíndice de vulnerabilidad topológica que en el caso de *AI* alcanza un 80 % (ver Figura 6.2). Esto se debe a que solo el 50 % de los nodos que conforman este grupo dependen de la fuente superficial y, en el caso de los otros grupos de consumidores, esa dependencia alcanza alrededor de un 75 %.

Por último, se puede observar en la Figura 6.2 que el grupo que alcanza el valor más alto para el subíndice de funcionalidad es el de consumo residencial (*RC*) con un 74 %. Esto se explica porque, del total de agua consumida por *RC* previa al evento disruptivo, sólo el 64 % depende de la fuente superficial, siendo el grupo con la menor dependencia. Por lo tanto, se tiene que mientras mayor sea la dependencia de cierto grupo de consumidores de fuentes vulnerables, menor será su resiliencia, tanto topológica como funcional.

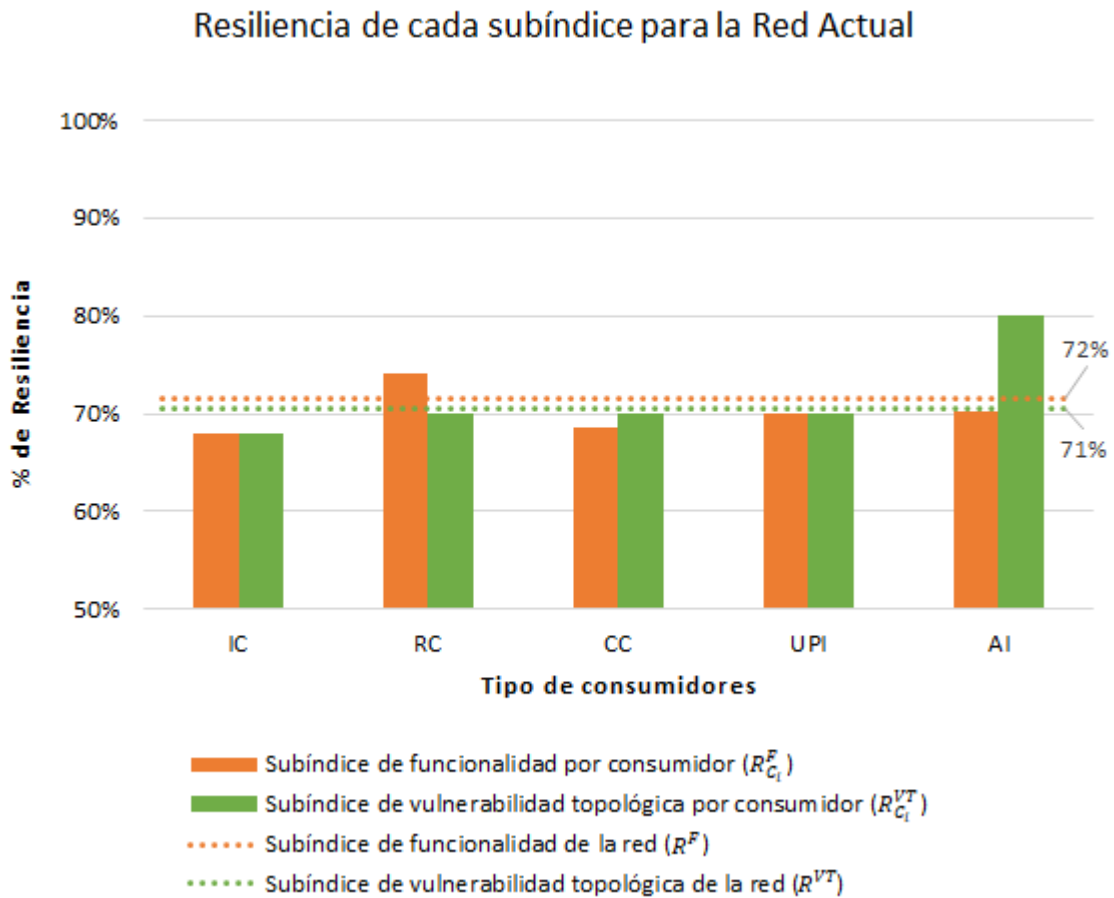


Figura 6.2: Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

6.2. Red hídrica optimizada del Gran Santiago

La configuración de la red optimizada del Gran Santiago también se expone en el capítulo anterior, representándose a través de la Figura 5.2. En el caso de esta configuración se aplica el índice de resiliencia para los dos casos particulares ya mencionados, presentándose los resultados respectivos en las siguientes subsecciones.

6.2.1. Sin adaptabilidad de la red

Se aplica el índice de resiliencia en la red optimizada, considerando que esta no se adapta al evento disruptivo. Esto se realiza con fin de acercar el problema a la realidad, ya en un funcionamiento normal de red, la adaptabilidad post evento disruptivo puede demorarse y, debido a que no se incluye la temporalidad en el índice de resiliencia propuesto, se vuelve necesario analizar este posible escenario.

En la Figura 6.3 se exponen los resultados obtenidos en este caso, donde se puede observar el valor de la resiliencia para cada grupo de consumidores y también para la red en su totalidad, correspondiente a un 86 %.

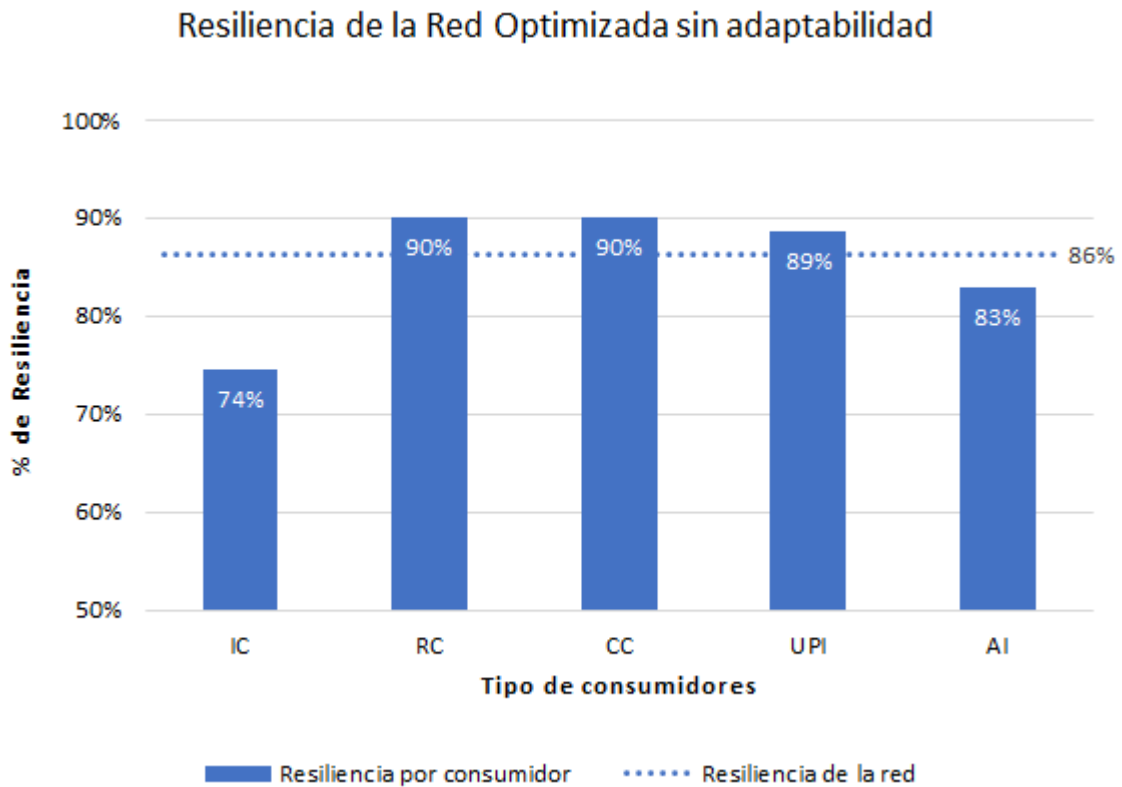


Figura 6.3: Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago sin considerar su adaptabilidad al evento disruptivo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

Luego, se presenta la Figura 6.4 que tiene por objetivo detallar el resultado anterior, mostrando el valor de cada subíndice para cada grupo de consumidores y para la red en general. De este gráfico se obtiene que el subíndice de funcionalidad de la red hídrica optimizada alcanza un valor de 94 % y el de vulnerabilidad topológica un 78 %.

En la Figura 6.3 se puede observar que el grupo de consumo industrial (*IC*) es el menos resiliente con un 74 %, seguido por el consumo de riego para la agricultura (*AI*) con un 83 %. Esto se explica por la dependencia que mantienen ciertos nodos de estos conjuntos de la fuente superficial. En el caso del grupo *IC* uno de sus nodos depende totalmente de la fuente superficial y en el caso del grupo *AI* uno de sus nodos depende parcialmente de esta fuente (ver Figura 5.2, nodo 7_13VOL y nodo 51_GF, respectivamente).

Resiliencia de cada subíndice para la Red Optimizada sin adaptabilidad

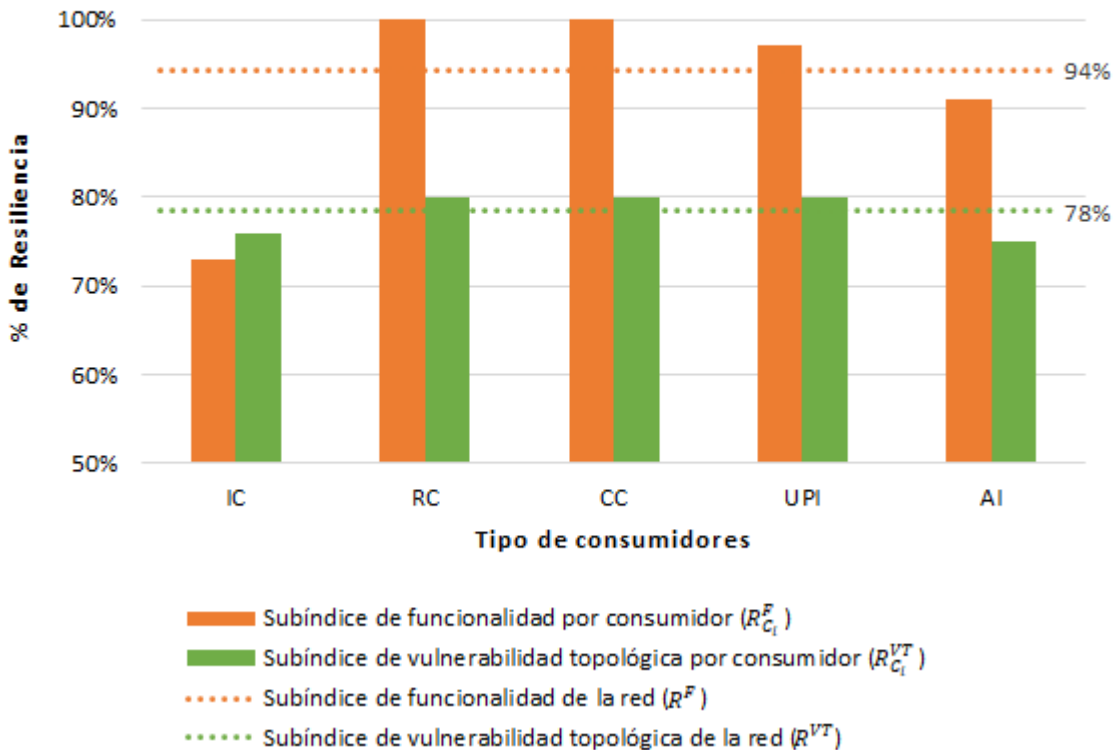


Figura 6.4: Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago sin considerar su adaptabilidad al evento disruptivo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

Por otro lado, en la Figura 6.4 se puede apreciar que en la mayoría de los grupos de consumidores (ha excepción de *IC*), el valor del subíndice de funcionalidad es superior al subíndice de vulnerabilidad topológica.

Se tiene que el subíndice de vulnerabilidad topológica evalúa la dependencia de los nodos de sus respectivas fuentes de alimentación, a través de las conexiones existentes, ignorando el valor del flujo de agua que se transporta. Por ende, dada la configuración de la red, la mayoría de los nodos de consumo dependen tanto de la fuente superficial como de la fuente subterránea y en algunos casos de PTAS. No obstante, el 80% de la alimentación externa en esta configuración proviene de la fuente subterránea, la cual no se ve afectada por el evento disruptivo y en consecuencia los flujos alimentados no cambian significativamente. Finalmente, esto se traduce en el alto valor del subíndice de funcionalidad.

6.2.2. Con adaptabilidad de la red

Se aplica el índice de resiliencia en la red optimizada, considerando que si se adapta al evento disruptivo, por lo que, en este caso se implementa el índice tal como esta definido en el Capítulo 4. Cabe destacar que para satisfacer la demanda de los nodos que pueden verse beneficiados por esta adaptabilidad de la red, es necesaria una capacidad adicional de la PTAP no afectada por el evento disruptivo igual al 0,45 %. En otras palabras, si la capacidad adicional es mayor al 0,45 % solo se ocupa este porcentaje para redirigir los flujos de agua.

En la Figura 6.5 se exponen los resultados obtenidos en este caso, donde se puede observar el valor de la resiliencia para cada grupo de consumidores y también para la red en su totalidad, correspondiente a un 87 %.

Luego, en la Figura 6.6 se detalla el resultado anterior mostrando el valor del cada subíndice para cada grupo de consumidores y también para la red. Por lo tanto, se obtiene que el subíndice de funcionalidad de la red hídrica optimizada (con adaptabilidad) alcanza un valor de 95 % y el subíndice de vulnerabilidad topológica un 78 %.

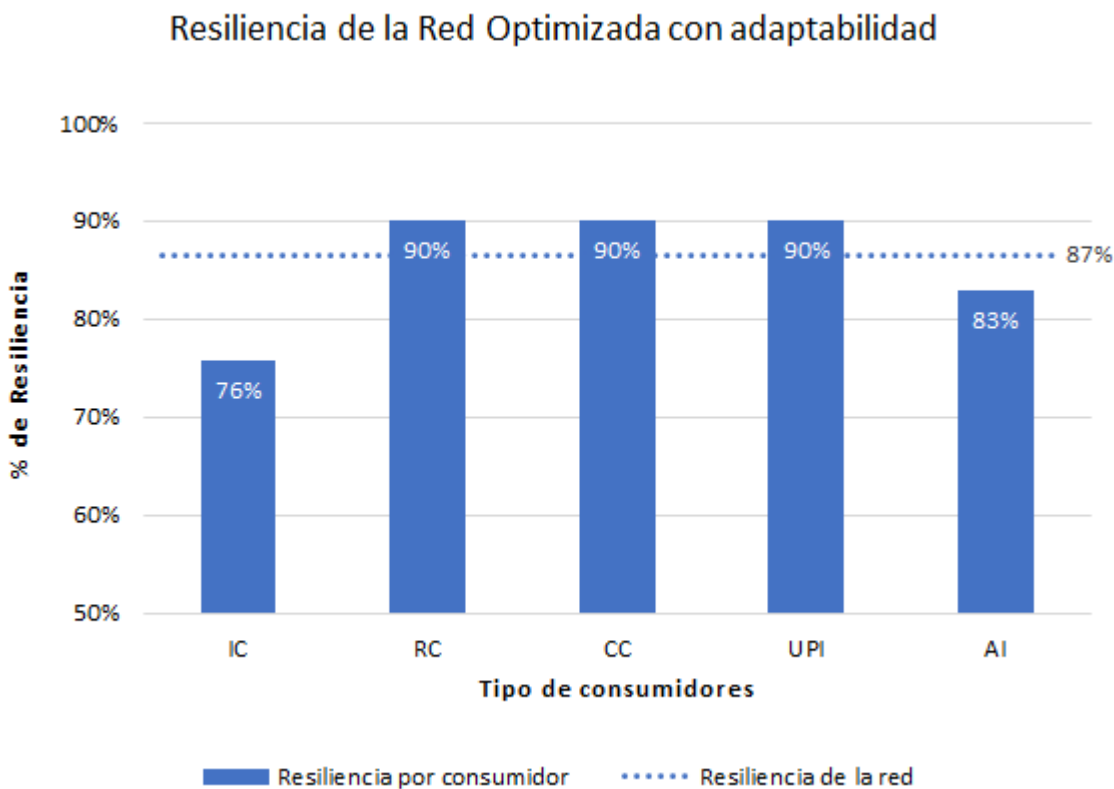


Figura 6.5: Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

Resiliencia de cada subíndice para la Red Optimizada con adaptabilidad

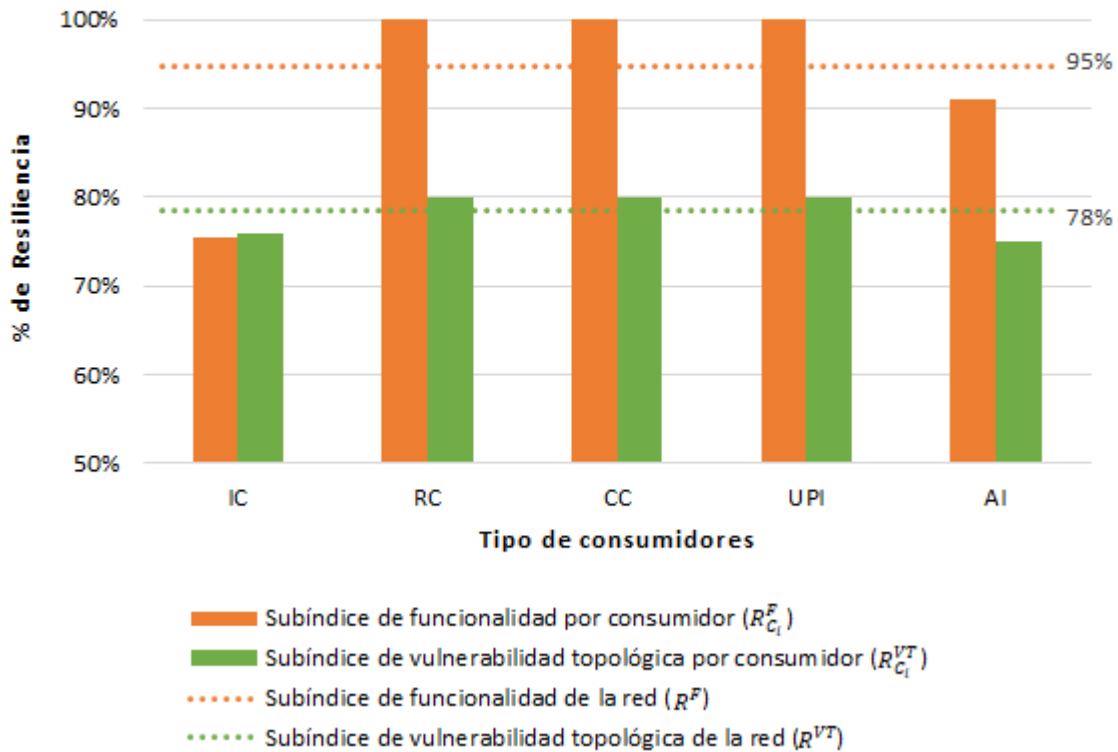


Figura 6.6: Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

Se puede apreciar que este caso no se diferencia significativamente de la implementación en la red optimizada sin considerar adaptabilidad, por lo tanto, el análisis anterior también es válido para este caso. Finalmente, la comparación de los resultados anteriores se aborda en la siguiente sección.

6.3. Análisis de los resultados

En la presente sección se realiza un análisis de los resultados expuestos anteriormente, con el fin de comparar la resiliencia de la red hídrica del Gran Santiago bajo las distintas configuraciones y, junto con ello, discutir los resultados.

En la Figura 6.7 se muestra un resumen de los resultados anteriores, presentando el valor del subíndice de funcionalidad, subíndice de vulnerabilidad topológica e índice de resiliencia, para la configuración de la red actual y la red optimizada. Además, de esta última se incluye la comparación de la red considerando adaptabilidad y no considerándola.

Cabe recalcar que la disposición de los nodos y conexiones de la configuración actual de la red hídrica (ver Figura 5.1) no permiten una posible adaptabilidad, y por lo tanto, solo se puede analizar dicho escenario.

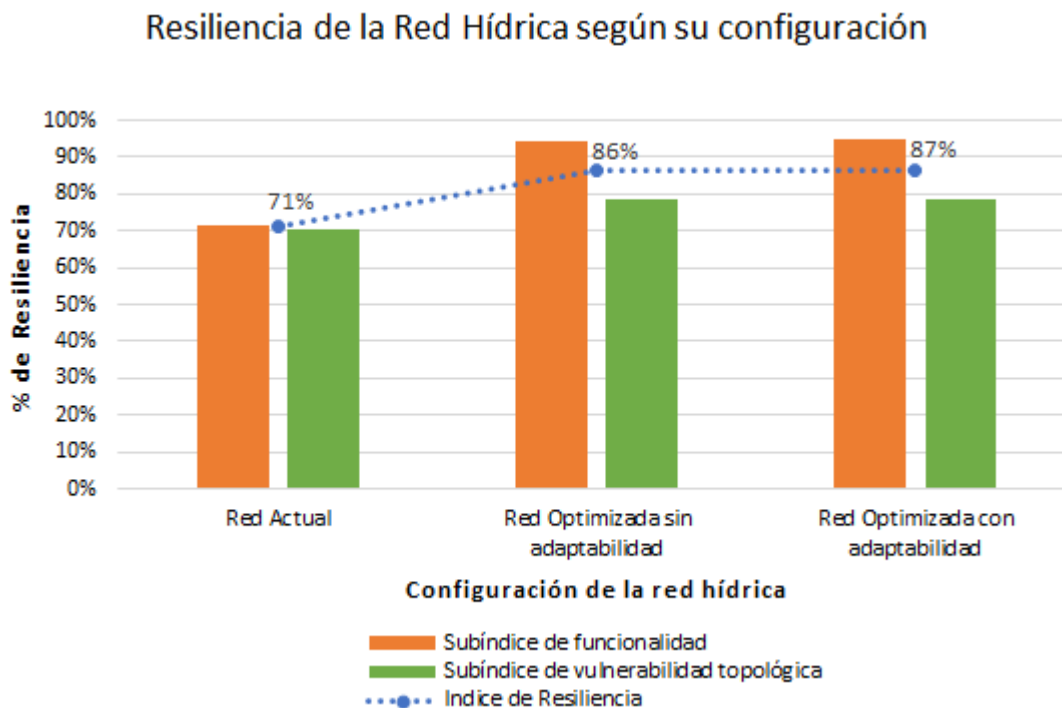


Figura 6.7: Gráfico de resiliencia por tipo de configuración de la red hídrica del Gran Santiago.

Se tiene que la configuración de la red optimizada considerando la adaptabilidad de la misma es la red más resiliente, alcanzando un valor de 87%. Esta es seguida de cerca por la configuración de la misma red optimizada pero sin considerar adaptabilidad, la que alcanza un valor del 86%. Esta diferencia se debe a que en el primer caso se incluye la redundancia o adaptabilidad de red, es decir en la medida de lo posible se utilizan rutas de suministro alternativas para satisfacer la demanda de los usuarios.

A pesar de lo anterior, se tiene que el error relativo del caso sin adaptabilidad respecto al escenario con adaptabilidad alcanza sólo un 1,1%, por lo que la diferencia entre ambos se podría considerar despreciable. De todas formas esta leve diferencia se explica porque sólo se puede compensar el flujo perdido por la planta 13_13HF (ver Figura 5.2), un flujo significativamente menor que el tratado por la planta 13_HF (menor al 1%). Por lo tanto, el suministro alternativo implica utilizar un 0,45% de la capacidad de tratamiento adicional de 13_HF, lo que se traduce en el aumento en el subíndice de funcionalidad de 94% a 95%. Finalmente, esa diferencia se ve también reflejada en el índice de resiliencia global que incrementa su valor de 86% a 87%.

Cabe destacar que el valor del subíndice de vulnerabilidad topológica se mantiene en 78% para el caso de la red optimizada con y sin adaptabilidad. Esto se debe a que para la medición del subíndice de vulnerabilidad topológica se necesita conocer solo las vulnerabilidades de los

nodos de alimentación y las conexiones existente; por lo que, al ser indiferente a la magnitud de los flujos transportados, y al no modificarse las conexiones entre nodos, en ambos casos analizados el valor de este subíndice será el mismo.

Luego se observa que la resiliencia de la red actual es menor que la resiliencia de la red optimizada, para cualquiera de los casos anteriores. Esta diferencia se explica en parte por la mayor dependencia de la red actual de la fuente superficial, en comparación a la configuración optimizada. En el caso de la red actual el 70 % del flujo alimentado al sistema proviene de la fuente superficial, en contraste con la red optimizada donde ese porcentaje se reduce al 20 %.

Otro factor que se debe tener en consideración para explicar esa diferencia es que en la red optimizada se cuenta con PTAS con capacidad de tratar el agua hasta la calidad requerida por ciertos grupos de consumidores (ver Figura 5.2). Esto permite que, en consecuencia, algunos nodos dependan de fuentes de alimentación menos vulnerables que la fuente superficial.

Por consiguiente, que la configuración optimizada sea más resiliente que la configuración actual del sistema, se da tanto por la disminución en el volumen de agua requerido de la fuente superficial, como por la mejora en la eficacia del uso de agua mediante las recirculaciones que posee el sistema.

6.3.1. Análisis de la vulnerabilidad al cambio climático

Para evaluar la dependencia de cada configuración de la red hídrica a distintos escenarios de vulnerabilidad, se presenta la Figura 6.8. En este gráfico se mide la resiliencia de la red actual y la red optimizada bajo los siguientes escenarios:

- Positivo: se asume que sólo la fuente superficial será vulnerable a los eventos extremos de precipitación en un 20 %.
- Intermedio: escenario ya evaluado.
- Negativo: se asume una vulnerabilidad de la fuente superficial igual a 50 %, de la fuente subterránea igual a 10 % y de las PTAS igual a 30 %.

Cabe destacar que estos valores se fijan con el objetivo de buscar representar un escenario con menor y mayor vulnerabilidad que el estudiado en la presente capítulo, sin realizar un análisis de mayor profundidad para su determinación. En otras palabras, se pretende analizar la sensibilidad del índice de resiliencia respecto a este parámetro.

En la Figura 6.8 se puede observar que bajo los tres escenarios anteriores, la resiliencia de la red optimizada es siempre mayor que la resiliencia de la red actual. Esto se debe a las características de la configuración de la red, como la ya analizada dependencia de la fuente superficial, que bajo todos los escenarios presentados es siempre la más vulnerable al cambio climático.

Con respecto al desempeño del índice de resiliencia, este presenta un comportamiento esperable y dependiente de la vulnerabilidad. En otras palabras, se cumple lo afirmado en literatura, ya que a mayor vulnerabilidad de las fuentes, menor será la resiliencia del sistema en estudio.

Resiliencia de la Red Hídrica bajo distintos escenarios de vulnerabilidad al cambio climático

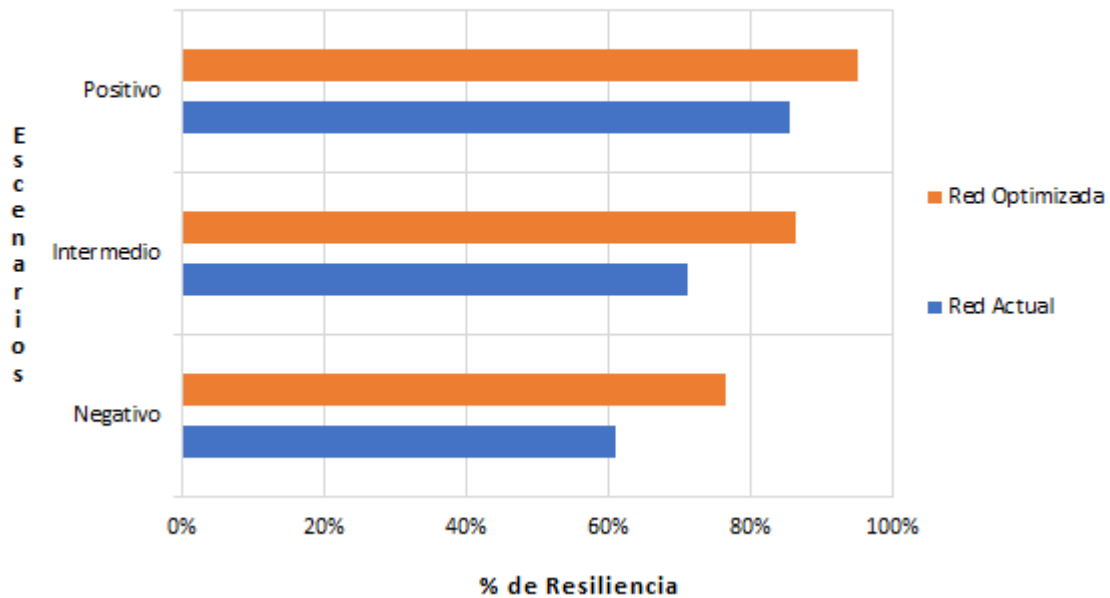


Figura 6.8: Gráfico de resiliencia de la red hídrica bajo distintos escenarios de vulnerabilidad.

En el Anexo B, se presenta el detalle de los resultados obtenidos; es decir, se incluyen los gráficos del índice de resiliencia y de los respectivos subíndices para cada grupo de consumidores bajo los escenarios de vulnerabilidad presentados anteriormente.

A pesar de que en este trabajo se define el evento disruptivo a estudiar, y se asume una magnitud para sus consecuencias (escenario intermedio de vulnerabilidad), se debe mencionar que los expertos afirman que aún existe incertidumbre respecto a los impactos del cambio climático en los recursos hídricos [3]. Esta incertidumbre se debe a las diferencias que existen entre los distintos modelos climáticos e hidrológicos desarrollados, ya que estos dependen a la vez de distintos escenarios de desarrollo económico y de emisiones de gases invernadero.

En línea con lo anterior, para fijar la vulnerabilidad de los nodos de abastecimiento se podría realizar un estudio detallado de los riesgos hidrológicos que enfrentan estos nodos, según su ubicación en la ciudad y en base a investigaciones específicas de la región. Cabe destacar que para lograr la precisión descrita anteriormente se requiere de una investigación detallada que no estaba dentro de los alcances del presente trabajo de título. Sin embargo, se destaca la importancia de abarcar este aspecto debido a la dependencia del índice de resiliencia propuesto, de los respectivos parámetros de vulnerabilidad. Además, una errónea determinación de estos parámetros se traduciría en una sub o sobre valorización de la resiliencia de un sistema.

6.3.2. Análisis de la importancia relativa de cada subíndice

En esta sección se presentan los valores del índice de resiliencia global de la red hídrica optimizada y de la red actual bajo distintos valores del parámetro β de la Ecuación 4.1, el cual representa la importancia relativa de cada subíndice.

En la Figura 6.9 se puede observar que el valor del índice de resiliencia de la red actual se mantiene prácticamente constante en 71 % bajo los distintos valores de importancia relativa evaluados. Esto se debe a que tanto el subíndice de funcionalidad como el subíndice de vulnerabilidad topológica tienen un valor similar en la evaluación de la resiliencia para la red actual (ver Figura 6.2).

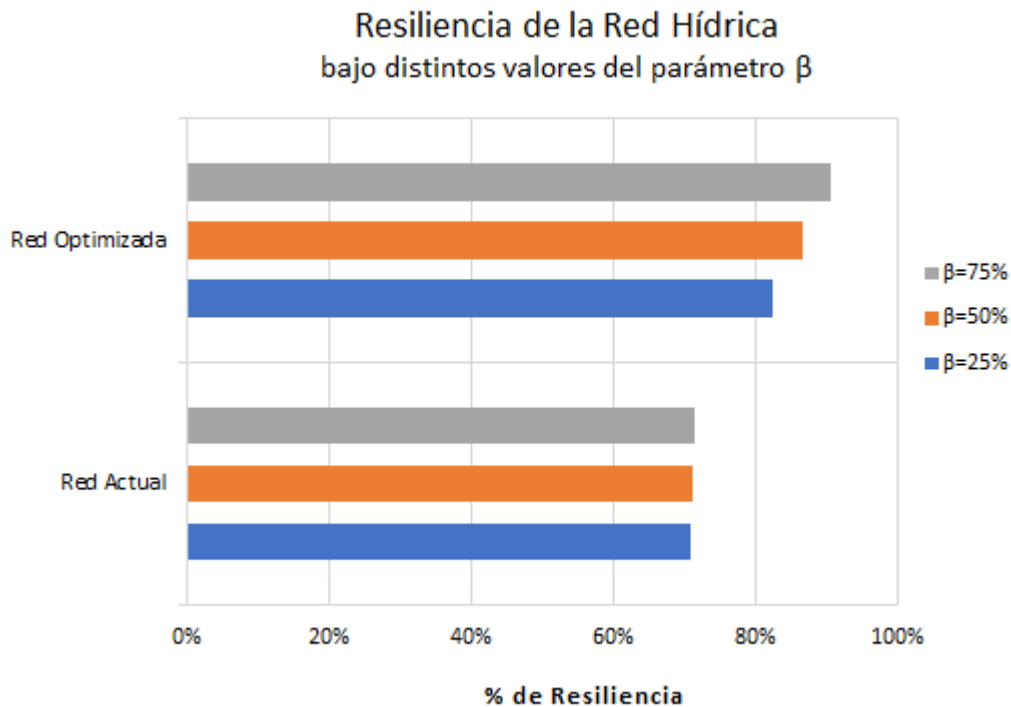


Figura 6.9: Gráfico de resiliencia de la red hídrica bajo distintos valores de importancia relativa de cada subíndice.

Por otro lado, en el caso de la red hídrica optimizada el valor del índice de resiliencia sí varía respecto a la importancia relativa de cada subíndice. Esta diferencia se debe a que el subíndice de funcionalidad alcanza un 95 % y el subíndice de vulnerabilidad topológica un 78 % (ver Figura 6.6), así, mientras mayor sea la importancia del subíndice de funcionalidad mayor será la resiliencia del sistema.

Capítulo 7

Conclusiones

Los efectos del cambio climático, como los eventos extremos de precipitación y las crecidas, se podrían atenuar mediante una gestión adecuada de los recursos hídricos. Esta gestión requerirá de inversión en infraestructura con el fin de modificar la configuración actual de los sistemas hídricos en pos de sistemas resilientes y sostenibles que utilicen eficientemente este recurso. En otras palabras, las inversiones en gestión hídrica pueden incorporar el análisis de la resiliencia como un nuevo marco para guiar la protección de los sistemas de abastecimiento de agua.

Ante la necesidad de contar con indicadores que permitan evaluar los impactos del cambio climático, se desarrolla el presente trabajo de título, el cual tuvo por objetivo crear un índice de resiliencia para evaluar la adaptación del sistema hídrico de una ciudad a los efectos del cambio climático. Para cumplir con dicho objetivo se realizó una revisión bibliográfica sobre índices de resiliencia, luego se caracterizó el sistema bajo estudio, se identificaron los posibles efectos del cambio climático en un red hídrica y se definió que un evento de precipitación extrema sería el evento disruptivo estudiado. Luego se construyó el índice de resiliencia y se implementó en el caso de estudio correspondiente a la red hídrica del Gran Santiago.

Con respecto a la revisión bibliográfica y las distintas métricas de resiliencia abordadas, se tiene que no existe un único marco para medir la resiliencia de un sistema. Aunque la mayoría de las publicaciones se centraba en estudiar la función del sistema antes y después de un evento disruptivo, la forma en que se evaluaba este aspecto también variaba. En particular, los índices de resiliencia en redes no hacen mayor énfasis en las diferentes características de los nodos pertenecientes a la red, asumiendo que todos tienen un comportamiento similar. Siendo este último punto abordado en el presente trabajo de título.

El indicador de resiliencia propuesto se compone de dos subíndices: el subíndice de funcionalidad, que busca medir el nivel de servicio de la red hídrica post evento disruptivo; y el subíndice de vulnerabilidad topológica, que busca abarcar los aspectos referentes a la configuración y la consecuente dependencia de fuentes vulnerables. Ambos subíndices centran su evaluación en los nodos de consumo, ya que en una red hídrica el principal objetivo es asegurar y satisfacer las necesidades de consumo de los usuarios.

Conjuntamente se incluye una definición de los subíndices de resiliencia para cada grupo de consumidores, lo que entrega una herramienta para que, en un futuro, se pueda privilegiar

la resiliencia climática de ciertos grupos de clientes por sobre otros. Por ejemplo, ante la ocurrencia de un evento disruptivo, sumado a un escenario de escasez hídrica, se puede llegar a privilegiar el consumo domiciliario y de ciertas actividades económicas, por sobre el riego de parques urbanos.

Sumado a lo anterior, se cumple con los alcances del trabajo de título al desarrollar un índice de resiliencia implementable en un problema de optimización lineal. Si bien la definición del subíndice de vulnerabilidad topológica implica calcular un promedio en base a las conexiones existentes, pudiendo generar la no linealidad del problema, esto se aborda utilizando el método de la “*Big M*” para la linealización de esta definición. En cuanto al subíndice de funcionalidad, para su cálculo se requieren parámetros como la demanda y se implementa mediante balances de masa (que no consideran concentraciones), por lo que su definición asegura su linealidad.

Con respecto al caso de estudio de la red hídrica del Gran Santiago, se puede garantizar que la configuración optimizada es más resiliente que la configuración actual del sistema, con un índice de resiliencia de 87 % en contraste con el 71 % de la red actual. Por lo anterior, las posibles modificaciones en la configuración de la red, planteadas en el Proyecto Fondecyt, permitirían asegurar para el Gran Santiago, un servicio de agua y saneamiento más resiliente que el actual.

Por otro lado, se puede afirmar que aún existe incertidumbre respecto a los impactos del cambio climático en los recursos hídricos. El parámetro de vulnerabilidad que se define en base a estos posibles efectos, se puede ver afectado por esta incertidumbre y por consiguiente también el valor del índice de resiliencia. Para abordar esto se propone realizar un estudio detallado de los riesgos hidrológicos específicos de la región, así como también asignar un valor diferente de vulnerabilidad dependiendo de la ubicación de las fuentes de agua y plantas posiblemente afectadas. Con lo anterior, se evitaría una errónea determinación de estos parámetros, previniendo así una sub o sobre valorización de la resiliencia de un sistema.

Como el parámetro de vulnerabilidad se fija en base a la información disponible de los posibles impactos del evento que se buscan estudiar, se afirma que la definición del índice de resiliencia propuesto en este trabajo podría adaptarse para evaluar otros eventos disruptivos. Estos pueden ser consecuencia o no del cambio climático, y se podrían evaluar siempre que se cuente con la información necesaria para asignar un valor a la vulnerabilidad de los respectivos nodos afectados.

Finalmente, referente a la importancia relativa de cada subíndice en el cálculo del índice de resiliencia global, se establece que para los casos en que la diferencia entre el valor de cada subíndice sea significativa, la asignación de la importancia relativa será concluyente en el índice de resiliencia global. Se recomienda fijar este valor en base a las necesidades de la medición que se está realizando, y si no se cuenta con un criterio en particular, se considera pertinente asignar igual importancia a cada subíndice.

Bibliografía

- [1] UNITED NATIONS. UN-Water: Water and Climate Change. [en línea] <www.unwater.org/water-facts/climate-change/> [consulta: 09 diciembre 2019].
- [2] UNITED NATIONS. UN-Water Policy Brief on Climate Change and Water. [en línea] <www.unwater.org/publications/un-water-policy-brief-on-climate-change-and-water/> [consulta: 30 marzo 2020].
- [3] BATES, B.C., Z.W. KUNDZEWICZ, S. WU & J.P. PALUTIKOF. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2008. El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico VI del IPCC [en línea] <<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-sp.pdf>>.
- [4] BRUNEAU, M., CHANG, S. E., EGUCHI, R. T., LEE, G. C., O'ROURKE, T. D., REINHORN, A. M., SHINOZUKA, M., TIERNEY, K., WALLACE, W. A. & VON WINTERFELDT, D. 2003. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra* 19(4): 733-752.
- [5] CENTER FOR CLIMATE AND RESILIENCE RESEARCH Tres consecuencias del cambio climático que ya se sienten en Chile (Revista Qué Pasa) 29 octubre, 2018. Por Diego Istúriz [en línea] <<http://www.cr2.cl/tres-consecuencias-del-cambio-climatico-que-ya-se-sienten-en-chile-revista-que-pasa/>>.
- [6] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. Estrategia Nacional De Recursos Hídricos 2012-2025. Chile cuida el agua. [en línea] <http://www.mop.cl/documents/ENRh_2013_OK.pdf> [consulta: 07 mayo 2020].
- [7] FIKSEL, J. 2003. Designing resilient, sustainable systems. *Environmental science & technology* 37(23): 5330-5339.
- [8] DÍAZ, F., GORMÁZ, D., QUIÑONES, C., SANDOVAL, M., & RIFFO, J. 2019. Progress report: “Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation”. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [9] GORMAZ CUEVAS, D., RIFFO-RIVAS, J., MONTASTRUC, L., BRÜNING-GONZÁLEZ, M. & DÍAZ ALVARADO, F. 2020. A Multi-Objective Optimization Model to Plan City-Scale Water Systems with Economic and Environmental Objectives: A Case Study in Santiago, Chile. *Journal of Cleaner Production*. 123737. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.123737](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123737).
- [10] PAGANO, A., SWEETAPPLE, C., FARMANI, R., GIORDANO, R., & BUTLER, D. 2019. Water distribution networks resilience analysis: A comparison between graph theory-based approaches and global resilience analysis. *Water Resources Management* 33(8):

2925-2940.

- [11] RUS, K., KILAR, V., & KOREN, D. 2018. Resilience assessment of complex urban systems to natural disasters: a new literature review. *International journal of disaster risk reduction* 31: 311-330.
- [12] HOSSEINI, S., BARKER, K., & RAMIREZ-MARQUEZ, J. 2015. A Review of Definitions and Measures of System Resilience. *Reliability Engineering & System Safety* 145: 47-61.
- [13] LIU, W., & SONG, Z. 2020. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. *Reliability Engineering & System Safety* 193: 106617.
- [14] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española, 23.^a ed., [versión 23.3 en línea]. <<https://dle.rae.es>> [consulta: 20 agosto 2020].
- [15] VALENZUELA-VENEGAS, G., HENRÍQUEZ-HENRÍQUEZ, F., BOIX, M., MONTASTRUC, L., ARENAS-ARAYA, F., MIRANDA-PÉREZ, J., & DÍAZ-ALVARADO, F. A. 2018. A resilience indicator for Eco-Industrial Parks. *Journal of Cleaner Production* 174: 807-820.
- [16] OMER, M., NILCHIANI, R., & MOSTASHARI, A. 2009. Measuring the resilience of the global internet infrastructure system. En: 3rd Annual IEEE Systems Conference. IEEE. pp. 156-162.
- [17] TODINI, E. 2000. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban water* 2(2): 115-122.
- [18] LIU, D. 2019. Evaluating the dynamic resilience process of a regional water resource system through the nexus approach and resilience routing analysis. *Journal of Hydrology* 578: 124028.
- [19] HERRERA, M., ABRAHAM, E., & STOIANOV, I. 2016. A graph-theoretic framework for assessing the resilience of sectorised water distribution networks. *Water Resources Management* 30(5): 1685-1699.
- [20] GOLARA, A., & ESMAEILI, A. 2017. Quantification and enhancement of the resilience of infrastructure networks. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 8(1): 04016013.
- [21] CIMELLARO, G., VILLA, O. & BRUNEAU, M. 2014. Resilience-Based Design of Natural Gas Distribution Networks. *Journal of Infrastructure Systems* 21: 05014005. DOI: [10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000204](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000204).
- [22] NAJAFI, J., PEIRAVI, A., & GUERRERO, J. M. 2018. Power distribution system improvement planning under hurricanes based on a new resilience index. *Sustainable cities and society* 39: 592-604.
- [23] YAZDANI, A., OTOO, R. A., & JEFFREY, P. 2011. Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach. *Environmental Modelling & Software* 26(12): 1574-1582.
- [24] FARAHMANDFAR, Z., & PIRATLA, K. R. 2018. Comparative evaluation of topological and flow-based seismic resilience metrics for rehabilitation of water pipeline systems. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 9(1): 04017027.
- [25] CIMELLARO, G. P., TINEBRA, A., RENSCHLER, C., & FRAGIADAKIS, M. 2016. New resilience index for urban water distribution networks. *Journal of Structural Engineering*

142(8): C4015014.

- [26] AMARASINGHE, P., LIU, A., EGODAWATTA, P., BARNES, P., MCGREE, J., & GOONETILLEKE, A. 2016. Quantitative assessment of resilience of a water supply system under rainfall reduction due to climate change. *Journal of Hydrology* 540: 1043-1052.
- [27] FANG, Y. P., PEDRONI, N., & ZIO, E. 2016. Resilience-based component importance measures for critical infrastructure network systems. *IEEE Transactions on Reliability* 65(2): 502-512.
- [28] HENRY, D., & RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. 2012. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliability Engineering & System Safety* 99: 114-122.
- [29] IKPONG, A., & BAGCHI, A. 2015. New method for climate change resilience rating of highway bridges. *Journal of Cold Regions Engineering* 29(3): 04014013.
- [30] REHAK, D., SENOVSKY, P., HROMADA, M., & LOVECEK, T. 2019. Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements. *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 25: 125-138.
- [31] PRABHAKAR, S.V. R. K. & SHIVAKOTI, BINAYA & MITRA, BIJON & NGOC BAO, PHAM. 2014. *Climate Change Adaptation in Water and Sanitation: Pertinent Issues and Way Forward for Adaptation Decision Making*.
- [32] SHAKOU, L. M., WYBO, J. L., RENIERS, G., & BOUSTRAS, G. 2019. Developing an innovative framework for enhancing the resilience of critical infrastructure to climate change. *Safety science* 118: 364-378.
- [33] STEVENINCK, E., ARRIETA, L., LLOYD, G., THEVENON, F., ASHIPALA, J., GALLO, I. & FENNI, Y. 2018. *Climate Change Adaptation and Integrated Water Resources Management*. DOI: [10.13140/RG.2.2.29264.66560](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29264.66560).
- [34] JARAMILLO, L. V., STONE, M. C., & MORRISON, R. R. 2018. An indicator-based approach to assessing resilience of socio-hydrologic systems in Nepal to hydropower development. *Journal of Hydrology* 563: 1111-1118.
- [35] MAIOLO, M., PANTUSA, D., CARINI, M., CAPANO, G., CHIARAVALLOTI, F., & PROCOPIO, A. 2018. A new vulnerability measure for water distribution network. *Water* 10(8): 1005.
- [36] BAROUD, H., RAMIREZ-MARQUEZ, J. E., BARKER, K., & ROCCO, C. M. 2014. Stochastic measures of network resilience: Applications to waterway commodity flows. *Risk Analysis* 34(7): 1317-1335.

Anexo A

Datos del caso de estudio

En el presente Anexo se expone información referente al caso de estudio: red hídrica del Gran Santiago. La siguiente información se obtiene del Proyecto Fondecyt y es utilizada en la implementación del índice de resiliencia, para las distintas configuraciones [8].

En la Tabla A.1 se muestra la demanda de cada uno de los nodos de consumo pertenecientes a la red, indicando su respectiva clasificación. Luego, en la Tabla A.2 se muestra el porcentaje de pérdida para los distintos nodos que pertenecen a la red, información que es utilizada en los distintos balances de masa.

Tabla A.1: Demanda de cada nodo de consumo perteneciente a la red hídrica del Gran Santiago [8].

Consumidores		Demanda
Clasificación	Nodo Específico	$[m^3/s]$
IC	7_13VOL	1,18
	7_21GF	0,09
	7_22SL	0,38
	7_23HF	0,13
	7_24RC	0,14
RC	21GF	0,98
	22SL	3,52
	23HF	2,69
	24RC	2,76
CC	31GF	0,32
	32SL	0,31
	33HF	0,39
	34RC	0,42
UPI	41GF	0,23
	42SL	0,27
	43HF	0,26
	44RC	0,31
AI	51GF	2,00
	53HF	5,91
TOTAL		22,29

Tabla A.2: Porcentaje de pérdida de agua en cada nodo dentro de la red [8].

Tipo de nodo	Nomenclatura	Porcentaje de pérdida
Plantas de Tratamiento de Agua Potable grandes	PTAPg	0,05
Plantas de Tratamiento de Agua Potable chicas	PTAPc	0,2
Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas grandes	PTASg	0,05
Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas chicas	PTASc	0,2
Plantas de Tratamiento de Agua Industrial	PTAI	0,05
Consumo Industrial	IC	0,15
Consumo Residencial	RC	0,1
Consumo Comercial	CC	0,1
Consumo del Riego de Parques Urbanos	UPI	0,55
Consumo de la Agricultura	AI	0,66
Distribución	DIST	0,15
Colección	COLL	0,15

Anexo B

Resultados adicionales

En este Anexo se presentan los resultados de la implementación del índice de resiliencia en la red hídrica actual y optimizada, considerando distintos escenarios de vulnerabilidad. Se asume un posible escenario positivo en que sólo la fuente superficial de la red sea vulnerable en un 20% al evento de precipitación extrema, y un escenario negativo en el que la fuente superficial aumente su vulnerabilidad a 50%, la fuente subterránea a un 10% y las PTAS a un 30%, ante el mismo evento.

En primer lugar, se presentan los resultados para la red hídrica actual. En la Figura B.1 y Figura B.2, se muestra el valor del índice de resiliencia y subíndices, respectivamente, considerando un escenario negativo de vulnerabilidad.

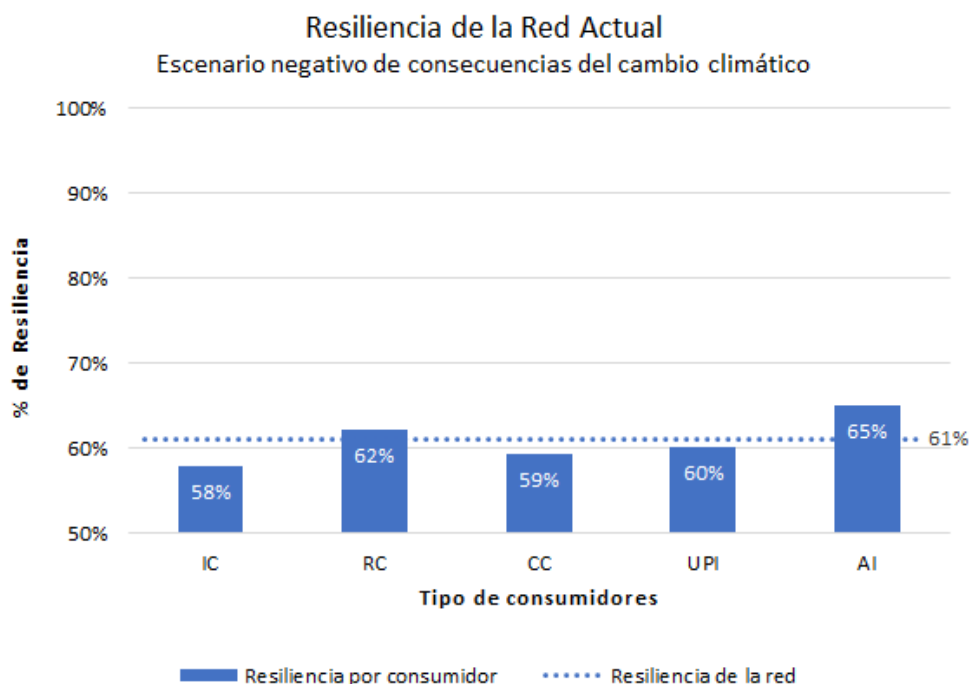


Figura B.1: Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago bajo un escenario de vulnerabilidad negativo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

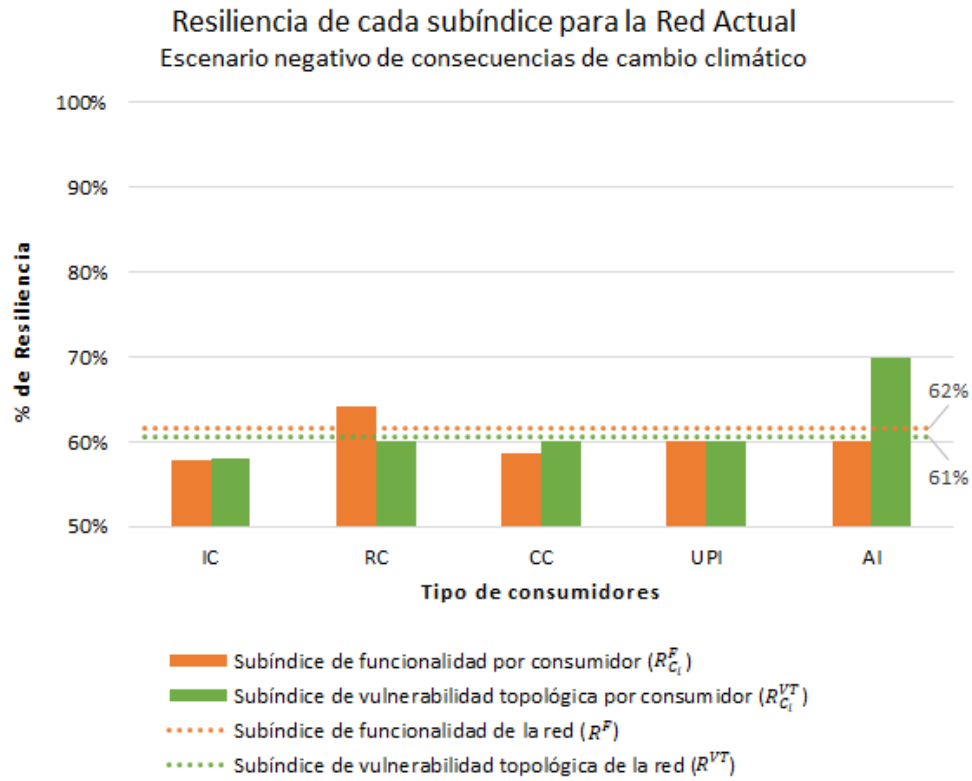


Figura B.2: Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago bajo un escenario de vulnerabilidad negativo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

Luego, en la Figura B.3 y Figura B.4 se muestran los mismos resultados anteriores de la resiliencia en la red hídrica actual, pero esta vez bajo un escenario positivo en que la vulnerabilidad de la fuente superficial es menor.

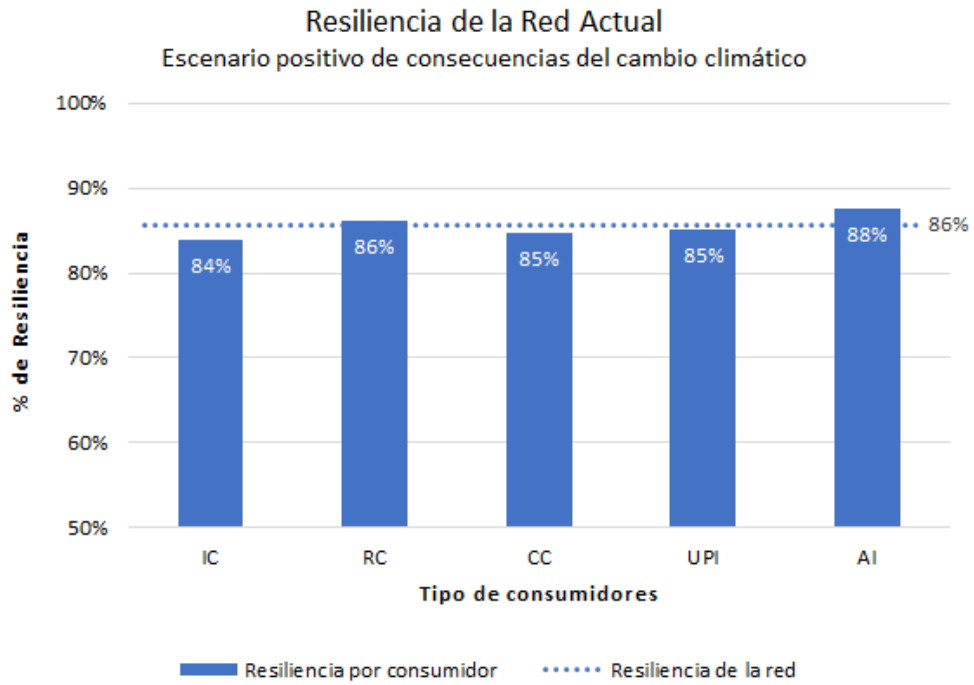


Figura B.3: Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago bajo un escenario de vulnerabilidad positivo.
IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

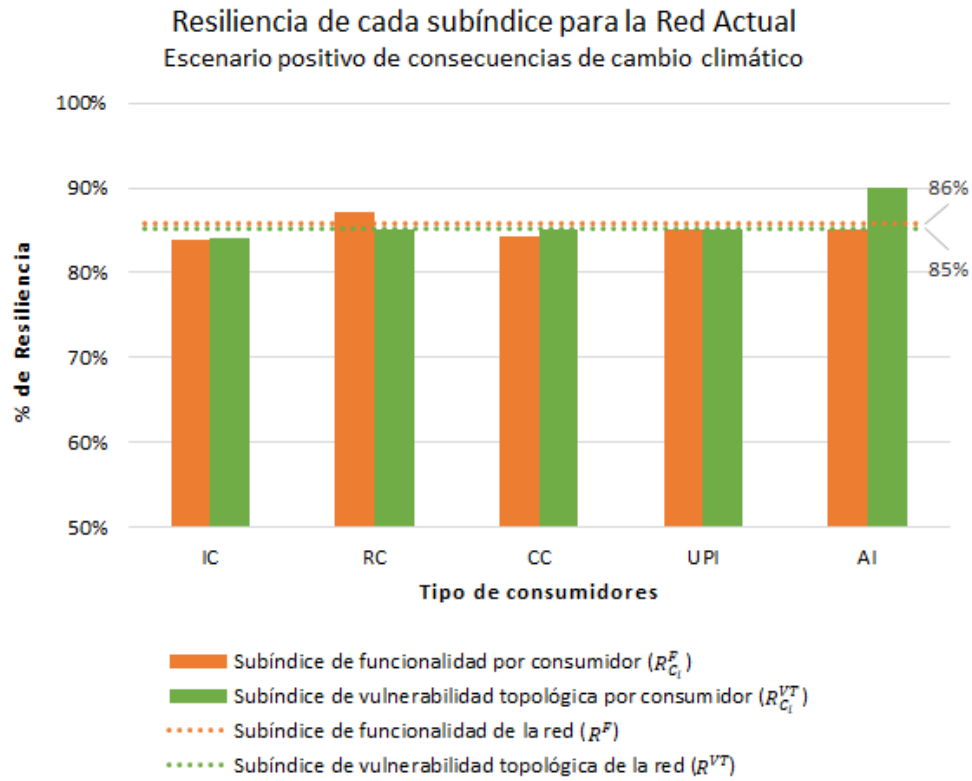


Figura B.4: Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Actual del Gran Santiago bajo un escenario de vulnerabilidad positivo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

Se presentan los resultados para la red optimizada del Gran Santiago en el escenario en que su adaptabilidad al evento disruptivo es posible. En la Figura B.6 se presenta el valor de la resiliencia para la red y para cada grupo de consumidores bajo un escenario de vulnerabilidad negativo. Luego, en la Figura B.6 se detallan los resultados anteriores.

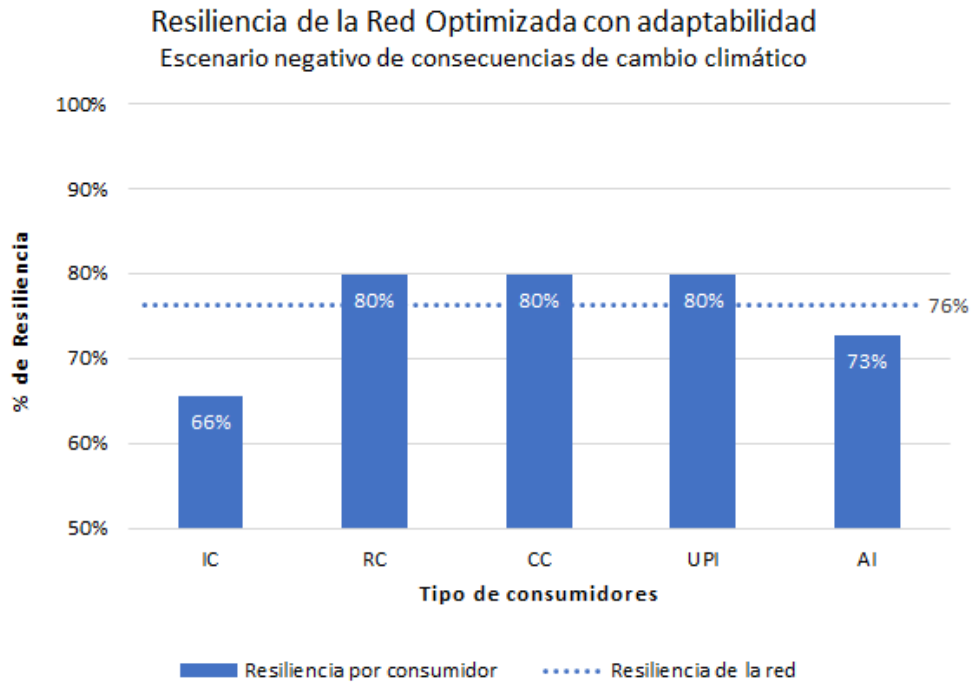


Figura B.5: Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo bajo un escenario de vulnerabilidad negativo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

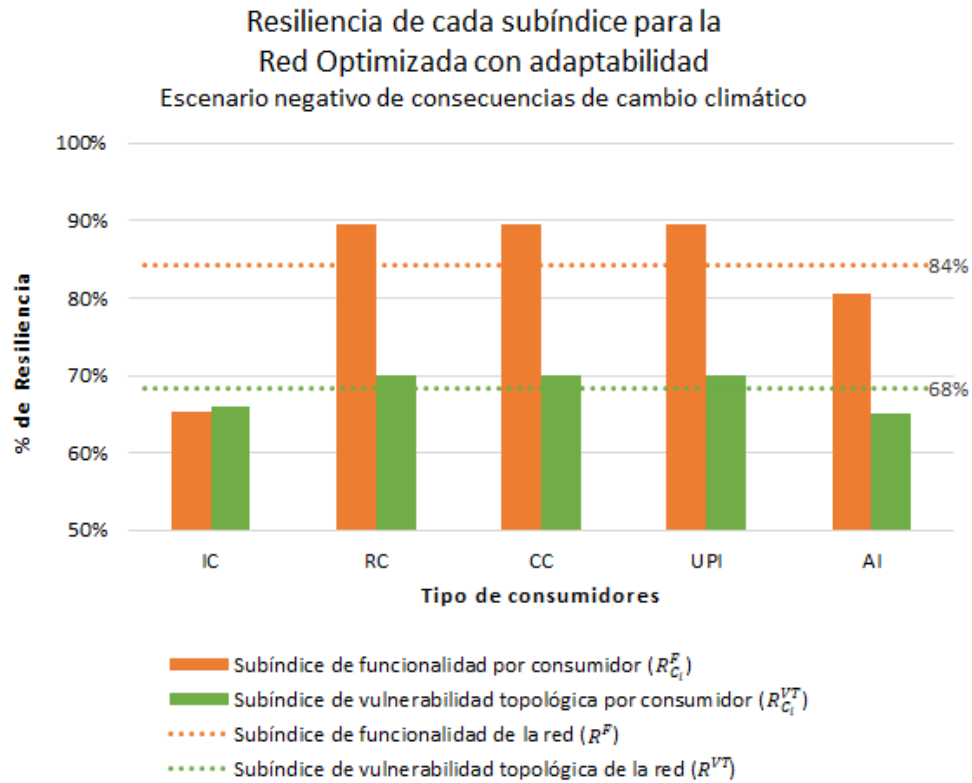


Figura B.6: Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo bajo un escenario de vulnerabilidad negativo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

Finalmente, se presentan los resultados de la implementación de índice para la red optimizada del Gran Santiago con adaptabilidad, bajo un escenario de vulnerabilidad positivo. En la Figura B.7 se presenta el valor de la resiliencia para la red y para cada grupo de consumidores. Luego, en la Figura B.8 se detallan los resultados anteriores.

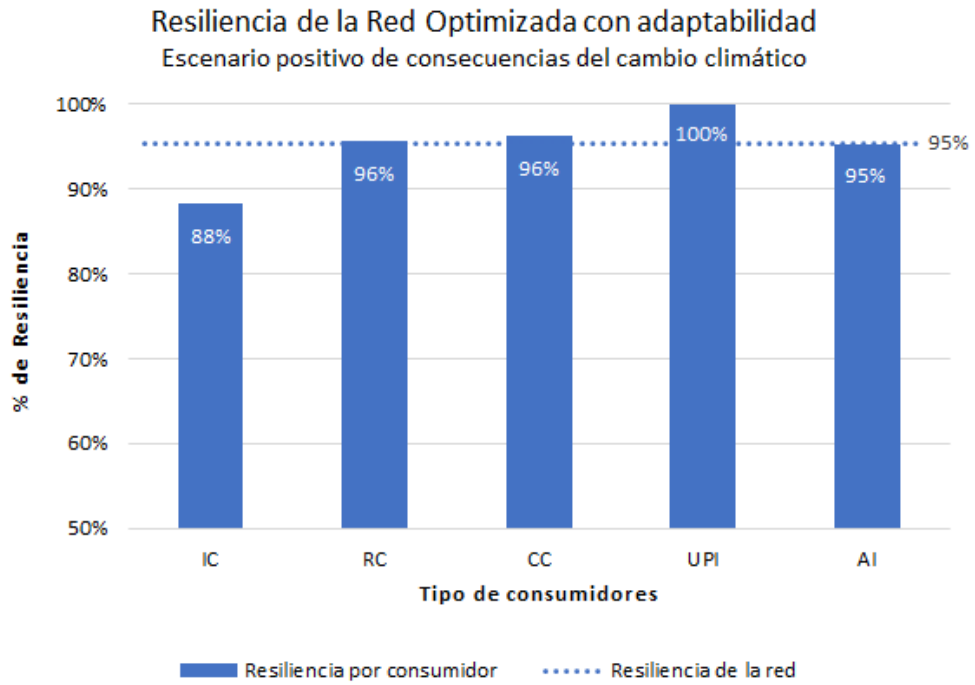


Figura B.7: Gráfico de resiliencia por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo bajo un escenario de vulnerabilidad positivo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.

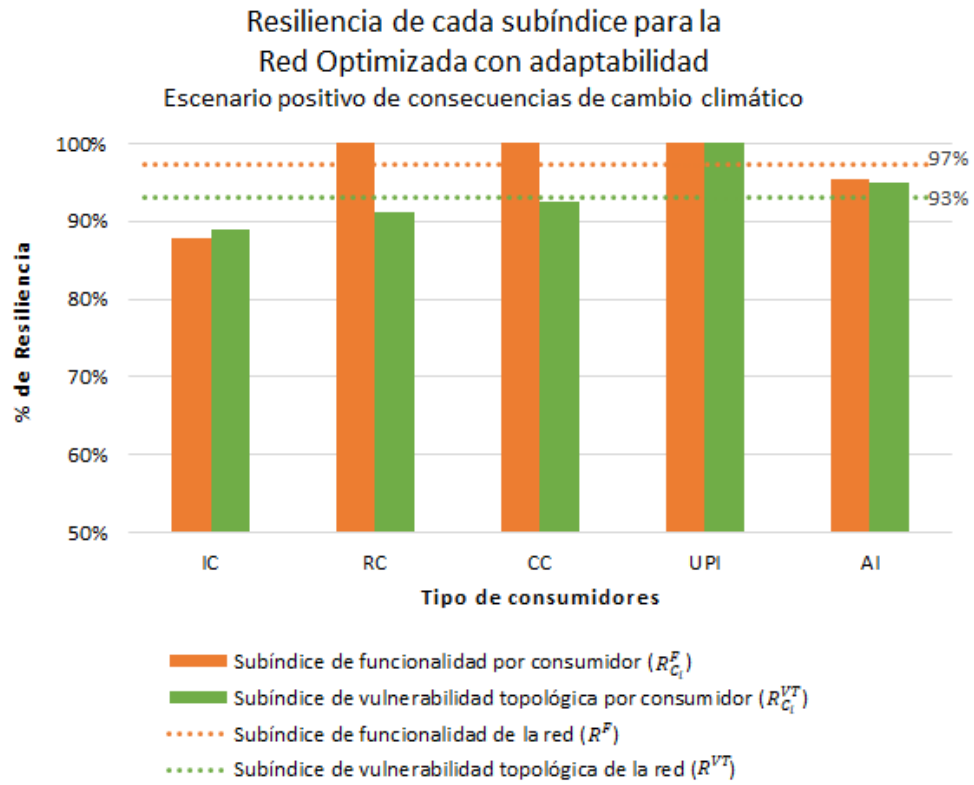


Figura B.8: Gráfico de resiliencia de cada subíndice por tipo de consumidor para la Red Optimizada del Gran Santiago considerando su adaptabilidad al evento disruptivo bajo un escenario de vulnerabilidad positivo.

IC: Consumo industrial; **RC:** Consumo residencial; **CC:** Consumo comercial; **UPI:** Riego en parques urbanos; **AI:** Riego para la agricultura.