



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**MARCO DE ANÁLISIS DE RIESGO
MULTI-AMENAZA EN REDES DE AGUA POTABLE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y
GEOTÉCNICA
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIEGO VICENTE ABARCA AGUILAR

PROFESORA GUÍA:
YOLANDA ALBERTO HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
YARKO NIÑO CAMPOS
SERGIO BARBERA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Proyecto CAPTA (Financiamiento CORFO)

SANTIAGO DE CHILE
2022

Resumen

**RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR AL
TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA
Y MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL CON MENCIÓN EN
ESTRUCTURAS, CONSTRUCCIÓN Y
GEOTECNIA**

POR: Diego Vicente Abarca Aguilar

FECHA: 2022

PROFESORA GUÍA: Yolanda Alberto Hernández

MARCO DE ANÁLISIS DE RIESGO

MULTI-AMENAZA EN REDES DE AGUA POTABLE

En esta tesis se propone una metodología de análisis de riesgo multi-amenaza de redes de agua potable, en donde se realizan simulaciones hidráulicas de la red en su estado normal y en un estado donde se ve afectada por distintos escenarios multi-amenaza y se comparan métricas hidráulicas calculadas a partir de los resultados de las simulaciones. Para realizar el análisis, se realiza un análisis hidráulico inicial a través del módulo de Python WNTR, luego se determinan escenarios utilizando modelos probabilísticos de las tres amenazas implementadas (sísmica, deterioro, e incendio debido a sismo o FFE), y se combinan estos escenarios para generar escenarios multi-amenaza. Para cada escenario multi-amenaza se cuantifica el daño sobre la red, el que se incorpora a la red y permite simular hidráulicamente la red en estado dañado para cada escenario multi-amenaza. Los resultados del análisis sobre la red en estado normal y los estados dañados se traducen en tres métricas hidráulicas (fracción de demanda cubierta o WSA, porcentaje de la red que cumple con presión requerida, porcentaje de la red que cumple con presión mínima) y una económica (multa debido a incumplimiento de presión promedio mínima normativa) que se manejan de distintas formas para generar mapas y curvas que permitan entender el efecto de las amenazas sobre la red.

La metodología propuesta e implementada se ejemplifica a través del análisis de dos redes hidráulicas, una operacional que se evalúa ante amenaza sísmica y de deterioro, y otra experimental que se evalúa ante amenaza sísmica, de deterioro, y de FFE. Los resultados permiten ilustrar la baja de desempeño en distintas métricas de las redes debido a los escenarios multi-amenaza, y que esta baja de desempeño aumenta para escenarios multi-amenaza más extremos. Se concluye la tesis con distintas propuestas para estudios posteriores, dadas las limitaciones de este trabajo.

Agradecimientos

Después de un largo proceso de titulación, agradezco mucho a la profesora Yolanda Alberto, quién me guio durante todos estos años y confió en mi para ser profesor auxiliar de su curso. Sin su buena disposición, infinito optimismo, y sentido del humor, este trabajo nunca habría sido terminado. Agradezco también a los miembros de mi comisión Yarko Niño y Sergio Barbera por participar en mi trabajo.

Muchas gracias a Catalina, Ismael, Marcela y Patricio, a los compañeros de pandemia, Esteban y Lorena, y a mis abuelos, mi tía, mi tío y mis primos. Gracias a Vale, por ser la mejor sorpresa que me trajo la pandemia y acompañarme incondicionalmente durante todo este tiempo.

Agradezco a los Arrieros, Ariel, Basti, Benja, Cata, Clau, Claudio, Cyntia, Fran, Indra, Karina, Lulo, Michelle, Nico, Octavio y Yisus, por tantas risas y momentos importantes. Ir a la universidad era maravilloso gracias a su compañía. Muchas gracias también a todas las personas que conocí durante mi trayecto universitario, todo lo que soy es gracias a cada momento que pasé con ustedes.

Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Hipótesis y Objetivos	2
1.1.1.	Objetivo general.....	3
1.1.2.	Objetivos específicos	3
1.2.	Estructura del trabajo	3
2.	Antecedentes.....	4
2.1.	Análisis de riesgo en redes de distribución de agua potable	4
2.2.	Análisis de redes hidráulicas	5
2.3.	Análisis de riesgo multi-amenaza	6
3.	Metodología.....	7
3.1.	WNTR	7
3.2.	Métricas en una RDAP.....	10
3.2.1.	Water service availability (WSA) o fracción de demanda cubierta.....	10
3.2.2.	Cumplimiento de presión mínima y requerida	11
3.2.3.	Métrica Económica	12
3.3.	Caracterización de escenarios de amenaza.....	13
3.3.1.	Amenaza Sísmica.....	14
3.3.2.	Amenaza Deterioro	20
3.3.3.	Amenaza de incendio posterior a sismo o FFE.....	22
4.	Marco de análisis multi-amenaza	27
4.1.	Determinación de escenarios multi-amenaza y temporalidad.....	30
4.1.1.	Sismo	30
4.1.2.	Deterioro	31
4.1.3.	Incendio posterior a sismo (FFE).....	31
4.1.4.	Determinación de Temporalidad	32
4.2.	Determinación de daño en escenarios multi-amenaza	35
5.	Resultados de análisis de riesgo multi-amenaza	37
5.1.	Resultados sobre red operativa.....	37
5.2.	Resultados de análisis sobre redes experimentales	52
6.	Discusión y conclusiones	59
7.	Bibliografía.....	61
Anexo	64
	Resultados de análisis sobre redes experimentales	64

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Resumen de parámetros históricos de sismos entorno a Valparaíso.	15
Tabla 3.2: GMPE implementadas en el trabajo.	16
Tabla 3.3: Definición de zonas geográficas utilizadas en el estudio de Flores et al. (2018).	25
Tabla 3.4: Población por región, Censo 2017 (INE,2018).	26
Tabla 3.5: Estimación de metros cuadrados de vivienda por habitante en distintas zonas del país.	26
Tabla 4.1: Datos para ejemplo de determinación de temporalidad.	32
Tabla 4.2: Tiempos únicos importantes de simulación.	33
Tabla 4.3: Amenazas activas por periodo de simulación.	33
Tabla 4.4: Tiempos iniciales T_i y finales T_f de segundo ejemplo.	34
Tabla 4.5: Tiempos únicos importantes de simulación.	34
Tabla 4.6: Amenazas activas por periodo de simulación.	34
Tabla 4.7: Parámetros de daño utilizados en los análisis.	36
Tabla 5.1: Parámetros análisis sísmico, red operativa.	37
Tabla 5.2: Parámetros de análisis de deterioro, red operativa.	37

Índice de Figuras

Figura 1.1: Diagrama de flujo de la metodología implementada.	2
Figura 2.1: Demanda según presión en PDA.	6
Figura 3.1: Análisis hidráulico inicial.	7
Figura 3.2: Ciclo de simulación de red dañada.	8
Figura 3.3. Red experimental.	9
Figura 3.4: Patrón de demanda de los nodos en la red experimental.	9
Figura 3.5: Red operativa.	10
Figura 3.6: Ejemplo de WSA de red en el tiempo, afectada por amenazas.....	11
Figura 3.7: Mapa de incumplimiento de presión mínima normativa.	12
Figura 3.8: Relación utilizada para caracterizar la métrica económica.	13
Figura 3.9: Caracterización de amenazas.	14
Figura 3.10: Catálogo de sismos utilizado. (USGS, 2021).....	15
Figura 3.11: Distribución de magnitud de momento a partir de análisis de MonteCarlo.....	16
Figura 3.12: Distribución de radio hipocentral a partir de análisis de MonteCarlo.	16
Figura 3.13: Distribución de PGA obtenida a partir de GMPE de Idini et al. (2017).	17
Figura 3.14: Efecto de la distribución espacial de Vs30 en las IM de las tuberías de la red.....	18
Figura 3.15: Curva de amenaza muestreada.	19
Figura 3.16: Obtención de escenarios de amenaza sísmica.....	20
Figura 3.17: Ejemplo de tasa de falla por kilómetro promedio en la red.	22
Figura 3.18: Ejemplo de probabilidad de falla promedio en la red.	22
Figura 3.19: Obtención de escenarios de deterioro.	22
Figura 3.20: Probabilidad de número de incendios promedio en nodos de la red.....	24
Figura 3.21: Obtención de escenarios de FFE.....	24
Figura 4.1: Determinación de escenarios multi-amenaza y temporalidad.....	28
Figura 4.2: Determinación de daño multi-amenaza.....	29
Figura 4.3: Curva de fragilidad para tuberías de asbesto-cemento (Garvs,2020).	30
Figura 4.4: Determinación de temporalidad.	32
Figura 4.5: WSA en simulación, ejemplo de temporalidad.....	35
Figura 5.1: Curva de amenaza sísmica.	38
Figura 5.2: Probabilidad de falla promedio en la red.	38
Figura 5.3: Mapas de daño debido a amenaza sísmica.....	39
Figura 5.4: Mapas de daño debido a amenaza de deterioro.....	40
Figura 5.5: Mapas de presión promedio en los nodos para distintos escenarios multi-amenaza. .	42
Figura 5.6: Mapas de incumplimiento de P_{req}	43
Figura 5.7: Patrón de WSA en el tiempo.....	44
Figura 5.8: Patrones de demanda esperada de la red operativa.	45
Figura 5.9: Patrones de demanda obtenidos de WNTR de la red operativa.	45
Figura 5.10: Curvas de riesgo de máxima variación de métricas.....	47
Figura 5.11: Curvas de riesgo de promedio de variaciones de métricas.	48
Figura 5.12: Curvas de máxima variación de métricas según años de instalación.....	49
Figura 5.13: Curvas de promedio de variaciones de métricas según años de instalación.	50
Figura 5.14: Curvas de métricas económicas.	51
Figura 5.15: Patrón de WSA en el tiempo.....	53
Figura 5.16: Curvas de riesgo de máxima variación de métricas.....	54

Figura 5.17: Curvas de riesgo de promedio de variaciones de métricas.	55
Figura 5.18: Curvas de máxima variación de métricas según años de instalación.....	56
Figura 5.19: Curvas de promedio de variaciones de métricas según años de instalación.	57
Figura 5.20: Curvas de métricas económicas.	58

1. Introducción

Los sistemas de agua potable pueden verse afectados por distintas amenazas que perjudiquen su capacidad de transportar agua a sus clientes. Por lo general, las empresas pueden determinar las amenazas que afectan a los sistemas, pero es más difícil determinar el nivel de riesgo al que se encuentran debido a las incertidumbres acerca de las vulnerabilidades y consecuencias (Grigg, 2003).

El riesgo se puede entender como una medida de las consecuencias de una situación adversa combinadas con la probabilidad de que ésta suceda. Los análisis de riesgo se utilizan para ayudar a entender qué puede salir mal, estimar la posibilidad y las consecuencias, y para desarrollar estrategias de mitigación (Ezell, 2007), pero en general se puede decir que un análisis de riesgo permite la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre. El trabajo presentado en este documento se enfoca en la capacidad de determinar el comportamiento de un subsistema del sistema de distribución de agua potable, lo que permitiría aplicar este tipo de metodologías.

Dentro de un análisis multi-amenaza, es esencial evaluar el nivel respectivo de cada amenaza. Las amenazas se podrían analizar de manera separada considerando independencia entre ellas e integrarlas para considerar la amenaza general, pero dado que los procesos en sistemas complejos no son necesariamente independientes (existen efectos cascada, causas de falla común, eventos compuestos, amenazas coincidentes y efectos de sinergia), ignorar esas relaciones puede llevar a subestimar el nivel real de peligro. La dificultad principal en la comparación de amenazas múltiples son las distintas formas de cuantificar sus efectos, por lo que se debe establecer un marco de criterios compartidos que describan las amenazas.

Esta tesis está enmarcada en el Proyecto 2 del Centro Avanzado de Tecnologías del Agua (CAPTA), que busca cuantificar el riesgo de pérdidas en redes de agua potable y proporcionar un sistema de soporte de decisiones que permita mejorar la eficiencia de estas redes. Este trabajo busca encontrar un marco de análisis adecuado que permita incluir un enfoque multi-amenaza en un sistema de agua potable. A través de la evaluación de métricas de desempeño hidráulicas y económicas, se pretende evaluar el riesgo de un sistema de distribución de agua potable ante diversas amenazas para proporcionar herramientas adecuadas en la toma de decisiones que contribuyan a generar un sistema resiliente.

La metodología de análisis multi-amenaza propuesta en el trabajo se puede resumir por el diagrama de flujo presentado en la Figura 1.1. Se configura el análisis hidráulico computacional de la red a través del módulo de Python WNTR y se simula esta red en su estado original. Luego se caracterizan las distintas amenazas para determinar escenarios de amenaza de cada una, a través de

distintos modelos probabilísticos. Se determina el efecto de estos escenarios sobre los elementos de la red y se combinan para definir los distintos escenarios multi-amenaza. Los efectos de las amenazas pueden actuar en momentos distintos de la simulación hidráulica, por lo que se determina la temporalidad dentro del análisis. Para cada escenario multi-amenaza se traduce el efecto de las amenazas en daño a la red, el que luego se introduce dentro del análisis hidráulico de lo que se considera la red dañada para cada escenario multi-amenaza. Finalmente, se utilizan tres métricas hidráulicas y una métrica económica para cuantificar el efecto de los escenarios multi-amenaza sobre la red dañada en comparación con la red en su estado original.

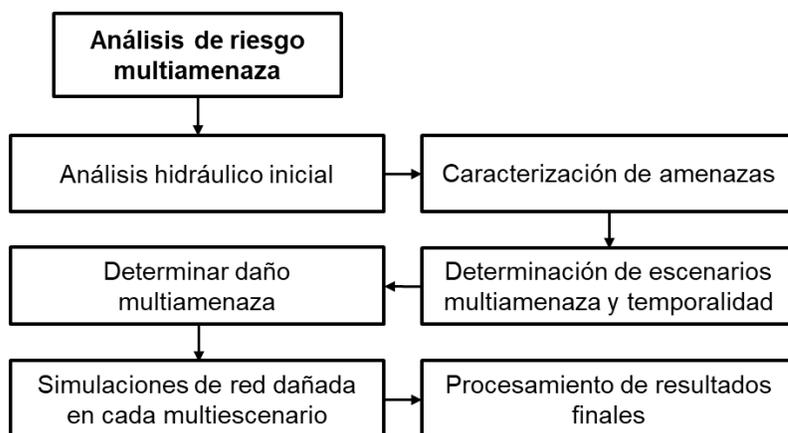


Figura 1.1: Diagrama de flujo de la metodología implementada.

1.1. Hipótesis y Objetivos

La hipótesis de este trabajo es que el efecto de un marco multi-amenaza sobre un sistema de distribución de agua potable puede ser modelado numéricamente y cuantificado bajo distintas métricas. En este trabajo se busca desarrollar una metodología que permita cuantificar el riesgo sobre una red de distribución de agua potable dado la ocurrencia de escenarios de amenaza cuya ocurrencia está dada por distribuciones probabilísticas asociadas a características de la red. La implementación computacional de la metodología incluye el análisis de amenaza sísmica, amenaza de deterioro de las tuberías de la red, y amenaza de incendio luego de la ocurrencia de eventos sísmicos (FFE). Para cada caso, se generan curvas que permitan cuantificar el efecto de las distintas combinaciones de amenazas en base a distintas métricas de desempeño de la red, y también se presentan mapas de ciertas métricas para escenarios específicos, que permitan comparar rápidamente el efecto sobre la red de escenarios específicos.

1.1.1. Objetivo general

El objetivo general es generar una metodología de riesgo multi-amenaza en sistemas de agua potable que brinde apoyo a la toma de decisiones para mejorar la eficiencia del sistema en cuanto a las pérdidas que se presentan debido a la ocurrencia simultánea o independiente de distintas amenazas.

1.1.2. Objetivos específicos

Se cumple con los objetivos específicos de proponer un marco de análisis de riesgo que permita analizar simultáneamente el efecto de distintas amenazas sobre una red de distribución de agua potable, implementar el análisis computacional de redes de distribución de agua potable afectadas por amenazas que pueden actuar por sí solas o en conjunto, y ejemplificar el uso del marco multi-amenaza propuesto a través del modelamiento numérico de los efectos de tres amenazas actuando simultáneamente o por sí solas.

Se espera que los resultados obtenidos de este análisis permitan generar estrategias de mitigación, y que permitan determinar puntos o zonas vulnerables que haya que priorizar. Se busca que la metodología propuesta brinde apoyo en la toma de apoyo a la toma de decisiones para mejorar la eficiencia del sistema en cuanto a las pérdidas que se presentan debido a la ocurrencia simultánea o independiente de distintas amenazas

1.2. Estructura del trabajo

Esta tesis está estructurada en 7 capítulos y un anexo. En el capítulo 1 se realiza la introducción al trabajo. El capítulo 2 explica cómo se realizará los análisis hidráulicos en la metodología planteada. En el capítulo 3 se presenta la manera en que se caracterizarán los escenarios de amenaza de las tres amenazas implementadas. Dentro del capítulo 4 se detallará cómo se determinan escenarios de multi-amenaza, qué es la temporalidad y cómo se determina, y cómo se determina el daño sobre la red debido a los efectos de los escenarios multi-amenaza. El capítulo 5 consiste en la presentación de dos casos de estudio que ejemplifican la metodología propuesta. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo, mientras que el capítulo 7 corresponde a la bibliografía utilizada.

2. Antecedentes

2.1. Análisis de riesgo en redes de distribución de agua potable

Los sistemas de distribución de agua potable (RDAP) son esenciales y las redes de agua potable que se encargan de transportar agua hacia los consumidores son una parte vital de éstos. Las redes de distribución son sistemas complejos de infraestructura crítica, con numerosos elementos que las conforman, y su extensión las hace particularmente vulnerables a distintas amenazas, ya sean naturales o antropogénicas.

El riesgo se puede entender como una medida de las consecuencias de una situación adversa combinadas con la probabilidad de que ésta suceda. Los análisis de riesgo se utilizan para ayudar a entender qué puede salir mal, estimar la posibilidad y las consecuencias, y para desarrollar estrategias de mitigación (Ezell, 2007).

Uno de los principales propósitos del análisis de riesgo es utilizar los resultados como apoyo para la toma de decisiones. En el trabajo de Pagano et al. (2014) se desarrolló una metodología de análisis de vulnerabilidad de sistemas de distribución de agua potable, con el objetivo de que esta fuese capaz de facilitar la toma de decisiones ante situaciones de emergencia, entendiendo la vulnerabilidad como la susceptibilidad del sistema a situaciones de amenaza. Utilizan “Bayesian Belief Networks” (BBN), modelos estadísticos multivariable para un conjunto de variables definido en base a componentes cualitativas y cuantitativas, ajustando parámetros en base a opinión de expertos y validando los modelos con su aplicación sobre dos redes reales de Italia. El resultado final permitió determinar la vulnerabilidad de las redes ante distintas amenazas, indicando los elementos críticos y los modos de falla predominantes.

Por otro lado, la resiliencia de un sistema de agua potable se refiere a su habilidad de volver a un nivel normal de operatividad luego de una situación adversa (Klise et al., 2015) y es posible de cuantificar bajo distintas métricas, que se suelen clasificar entre topológicas, hidráulicas, de calidad del agua, de seguridad del agua, y económicas (Klise et al., 2017). Algunas métricas definen a la resiliencia bajo un solo valor cuantificable para toda la red, mientras que otras actúan en el tiempo y/o espacio, por lo que el uso de las métricas correctas puede ayudar a encontrar amenazas críticas de un sistema, elementos críticos, o momentos de tiempo críticos, y por lo tanto pueden ser una herramienta muy poderosa.

En muchas metodologías se utiliza una mezcla de análisis de riesgo con base en datos y en opinión de expertos. Los análisis cuantitativos basados completamente en datos históricos pueden ser difíciles de llevar a cabo debido a la falta de información que puede existir entorno a las amenazas del sistema, el daño experimentado y también debido a que los análisis numéricos pueden ser costosos computacionalmente. Sin embargo, cuando existe información suficiente o modelos validados capaces de suplir la información, es posible utilizar técnicas de análisis de riesgo más sofisticadas, como el análisis probabilístico que consiste en la obtención de escenarios de amenaza con probabilidades asociadas a diversas medidas de intensidad y el uso de curvas de fragilidad para determinar el daño o la pérdida en un sistema.

Para llevar a cabo un análisis de riesgo, es necesario conocer el comportamiento base de la infraestructura y los efectos que tendrían diferentes amenazas en su desempeño. En el caso de las redes de agua potable, se debe realizar un análisis hidráulico para definir una línea base y a partir de ella, pueden establecerse escenarios de falla o daño.

2.2. Análisis de redes hidráulicas

Cuando se realizan simulaciones hidráulicas de redes de distribución de agua se evalúa numéricamente el caudal en las tuberías y la presión en los nodos de la red en base a dos enfoques: análisis impulsado por demanda (DDA) o análisis dependiente de presión (PDA) (Tabesh et al., 2011). En el DDA se considera que la demanda en los nodos es fija, lo que permite simular rápidamente redes en buen estado, pero no permite analizar redes que presentan deficiencias de presión. Por el contrario, en el PDA se considera que la demanda depende de la presión nodal y puede variar. Esto permite analizar la red considerando situaciones de baja de presión, como fugas en el sistema. Dado que se realiza un análisis PDA, se considera que bajo una presión “requerida” la demanda que puede existir en un nodo se verá disminuida de acuerdo a su presión, siendo el límite una presión “mínima” tras la cuales la demanda será nula, como se muestra en la Figura 2.1. Una vez analizado el comportamiento hidráulico, es posible agregar daño en los elementos para ver el comportamiento en el sistema. Éste se mide a través de diferentes métricas para conocer el desempeño del sistema tras el impacto de una amenaza, de las cuales las utilizadas en el trabajo serán presentadas en la sección 3.2.

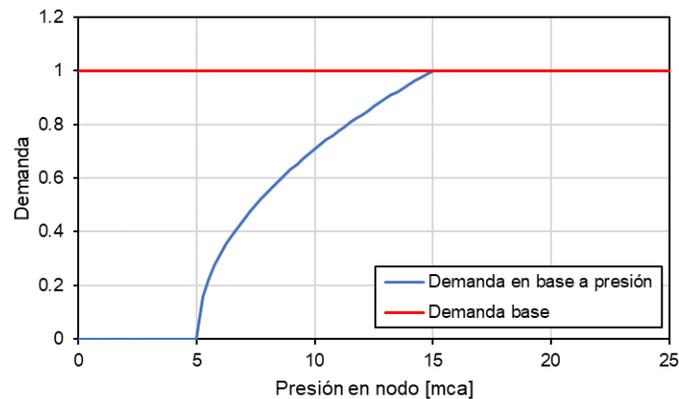


Figura 2.1: Demanda según presión en PDA.

2.3. Análisis de riesgo multi-amenaza

Se han desarrollado diversas metodologías para el estudio de riesgo asociado a esta infraestructura crítica, muchas de ellas enfocadas en la red de distribución, que corresponde el subsistema encargado de transportar el agua potable hasta los usuarios finales (Shinozuka, 1978; Khatri and Vairavamoorthy, 2011; Pagano et al., 2014; Lanzano et al., 2015; Klise et al., 2017).

Es posible realizar análisis de riesgo de una amenaza considerando modelos probabilísticos que cuantifiquen su ocurrencia y/o las consecuencias. Por ejemplo, en un análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA) se obtiene una curva de excedencia anual de ciertos valores de medida de intensidad (como la aceleración máxima de terreno, PGA) en un sitio, considerando todos los posibles eventos sísmicos y sus movimientos de tierra resultantes, junto a sus probabilidades de ocurrencia asociadas (Baker, 2013). Luego, se puede determinar el efecto de estas medidas de intensidad a través de curvas de fragilidad, que describen la probabilidad de que ocurra o se exceda un cierto nivel de daño ante alguna métrica asociada a la amenaza (Lallemant et al., 2015).

No obstante, en sistemas complejos como el de distribución de agua potable, hay una cantidad grande de factores y amenazas que presentan interacciones difíciles de evaluar con análisis individuales. En el trabajo de Khatri y Vairavamoorthy (2011) se reconoció que los sistemas de agua potable consisten en muchos subsistemas y elementos diferentes, que además podrían verse afectados por múltiples amenazas. Ellos propusieron una metodología para el análisis integrado de riesgos, donde se realizan jerarquizaciones de subsistemas, que permitirá más adelante acumular el riesgo de los elementos para los niveles más bajos en la jerarquía para obtener el riesgo integrado de un cierto nivel. Para identificar fuentes de amenazas, vulnerabilidades y riesgos a los distintos elementos utilizan la metodología Impulsor-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (Driver-Pressure-State-Impact-Response) DPSIR y se plantea utilizar modelos de sistemas para determinar si su comportamiento se encuentra dentro de rangos aceptables, llevando a una cuantificación del riesgo que eventualmente se traduce a índices de riesgo útiles para la evaluación de estrategias de mitigación.

3. Metodología

3.1. WNTR

En este trabajo se utilizará el módulo de Python WNTR (Water Network Tool for Resilience) diseñado para simular y analizar la resiliencia de sistemas de distribución de agua (Klise et al., 2017). WNTR fue desarrollado para extender las capacidades del software EPANET, el cuál es una herramienta desarrollada por la Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos (EPA). Se decidió trabajar con WNTR debido a sus muchas capacidades, como realizar los análisis hidráulicos por análisis dependiente de presión (PDA), incluir cambios en la red en base a curvas de fragilidad, o determinar métricas de resiliencia de la red.

Para cuantificar el efecto de escenarios multi-amenaza actuando sobre la red a analizar, se realiza como primer paso un análisis hidráulico inicial sobre la red en su estado normal como se indica en la Figura 3.1. Posteriormente se realizarán simulaciones hidráulicas donde la red presentará un estado de daño correspondiente al efecto estimado de cada escenario multi-amenaza de acuerdo a los pasos indicados en la Figura 3.2. Las métricas obtenidas de los resultados de las redes dañadas serán comparadas con las obtenidas de la red en estado normal, permitiendo cuantificar el efecto de cada escenario como la variación de las distintas métricas.

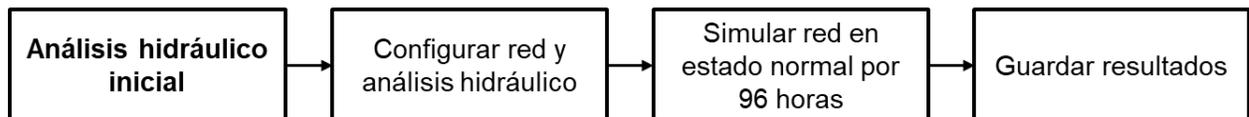


Figura 3.1: Análisis hidráulico inicial.

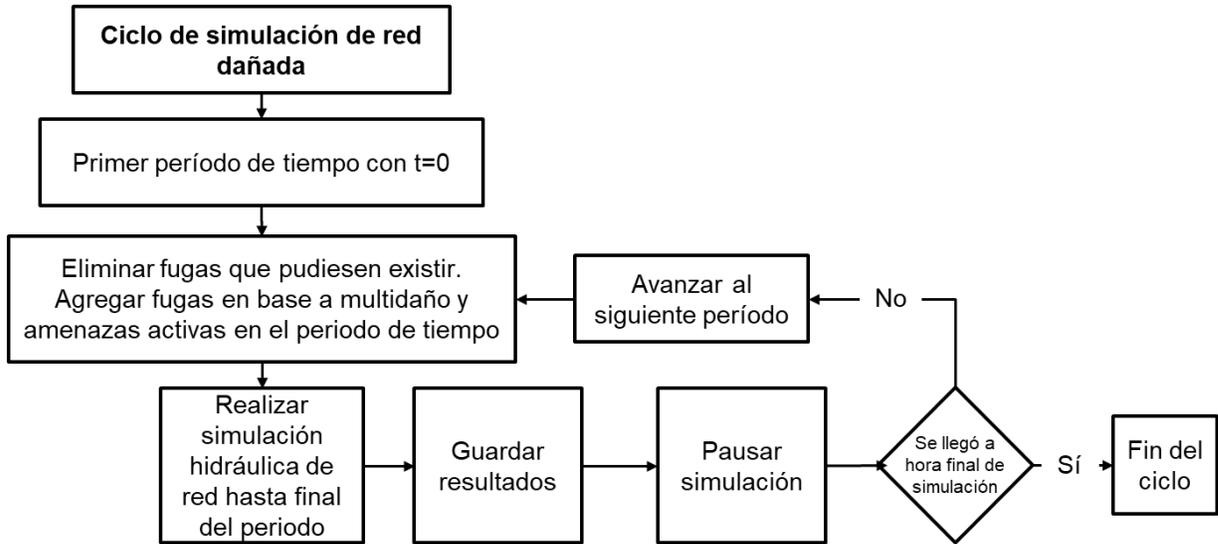


Figura 3.2: Ciclo de simulación de red dañada.

Para este trabajo, el daño a la red se implementa como fugas en los nodos del sistema. La plataforma WNTR permite agregar y quitar fugas en los nodos del sistema, las cuales presentan una demanda, d_{leak} (en m/s), dada por:

$$d_{leak} = C_d A \sqrt{2gh} \quad (3.1)$$

donde C_d corresponde al coeficiente de descarga, A es el área de la fuga en m^2 , g es la aceleración de gravedad en m/s^2 , y h es la carga hidráulica en m . En este trabajo se utilizan los valores por defecto de WNTR para C_d (0.75) y g ($9.81 m/s^2$), y se deja que h sea calculado internamente por el simulador. Así, la variable que se utiliza para considerar el daño debido a una amenaza es el área de fuga, a mayor daño, mayor área de fuga a considerar.

Durante la implementación de la metodología, los análisis fueron realizados sobre redes experimentales que consisten solamente de fuentes, tuberías y nodos de demanda. Sus nodos están distribuidos en el manto de un cono de forma tal que uno de los nodos se encuentre en la punta del cono y el resto forme un rectángulo visto en elevación en la Figura 3.3. A los nodos se les asigna un patrón de demanda dado por multiplicadores de una demanda base que varían con el tiempo. Las fuentes del sistema poseen una cierta carga hidráulica que mantienen durante todo el análisis. Los largos de las tuberías son los necesarios para conectar los nodos entre sí y poseen un diámetro uniforme de 0.0762 [m] (3 [in]) y un parámetro interno de WNTR llamado coeficiente de rugosidad de valor igual a 100.

Elevación en red, num_nodos=149, num_links=269

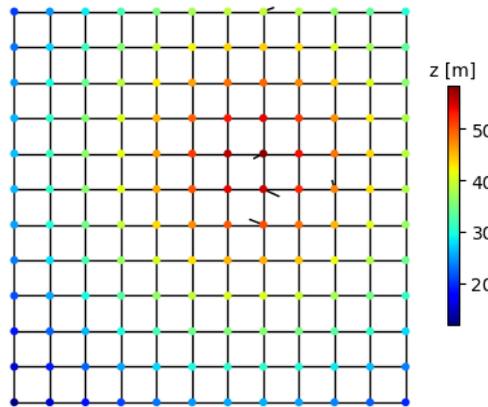


Figura 3.3. Red experimental.

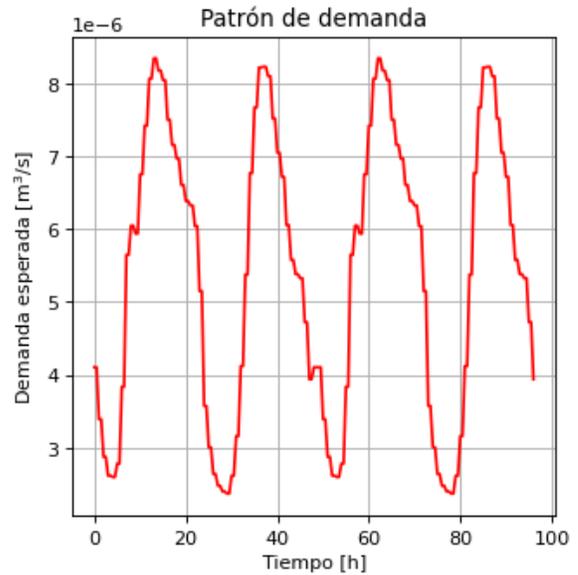


Figura 3.4: Patrón de demanda de los nodos en la red experimental.

Para ilustrar distintas características de los análisis multi-amenaza con la metodología implementada, se presentan en este trabajo resultados considerando una red modelo de 144 nodos, 5 reservorios, 269 tuberías, de 1.2 [km] por 1.2 [km] de largo. El patrón de demanda de los nodos es el mostrado en la Figura 1.1 y la carga hidráulica es 82.5 [m] en el nodo más alto de la red. Los análisis se consideran para la ciudad de Valparaíso con fines de definir el escenario sísmico. Se asume que todas las tuberías de la red tienen 10 años de instalación con 0.02 fallas por kilómetro hasta esa fecha y esta tasa aumentará en el tiempo.

Además, se presentan resultados sobre una red operativa ubicada en un cerro, presentada en la Figura 3.5. Se conoce la geometría de la red, las propiedades de sus elementos y datos correspondientes a su comportamiento hidráulico, pero no otros tipos de información que permitan caracterizar las amenazas. Debido a esto, se considera también que todas sus propiedades necesarias para el análisis son las mismas que en la red experimental del primer caso, por lo que el análisis es sólo ilustrativo.

Elevación en red, num_nodos=5038, num_links=6279

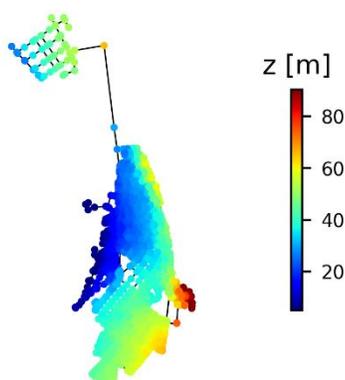


Figura 3.5: Red operativa.

Los resultados, que serán presentados en el capítulo 5, son sólo ilustrativos, ya que carecen de del uso de datos reales. Si bien se utilizan valores para las distintas etapas del análisis que se consideran razonables, no reemplazan una correcta caracterización de las propiedades del sistema, de las amenazas a la que éste está sujeto, ni a los estudios necesarios para realizar todas estas caracterizaciones de forma estricta.

3.2. Métricas en una RDAP

A partir de la simulación hidráulica a través del solucionador del módulo de Python WNTR (Klise et al., 2017) es posible calcular los valores de demanda, demanda de fuga, carga hidráulica y presión para cada nodo y para cada paso de tiempo. Al mismo tiempo, se estiman los valores de velocidad y flujo en las tuberías en el tiempo. Es posible agregar estos resultados de distintas formas para cuantificar el comportamiento integrado de la red ante distintas situaciones, por lo que en este trabajo se utilizan tres métricas hidráulicas y una métrica económica para ilustrar el efecto de las amenazas sobre la red. Las tres métricas hidráulicas con las que se trabaja fueron presentadas en el trabajo de Fernández (2021).

3.2.1. Water service availability (WSA) o fracción de demanda cubierta

Esta métrica está definida por la proporción entre la demanda que existe en un nodo y la demanda esperada en el mismo nodo, para un tiempo determinado. La demanda se obtiene a partir de la simulación hidráulica y la demanda esperada se calcula a partir de la demanda base y los patrones de demanda de cada nodo. En este trabajo se define a la WSA de la red como la WSA promedio entre todos los nodos para cada tiempo de análisis, lo que permite estudiar el efecto agregado de la amenaza sobre la demanda de la red completa en el tiempo. La WSA de cada nodo se calcula

internamente utilizando WNTR y se transforma en porcentaje con la ecuación (3.2), mientras que la WSA de la red con la ecuación (3.3). En la Figura 3.6 se presenta un ejemplo del efecto que distintas amenazas tendrían sobre el WSA de la red.

$$WSA_{nodo} = \frac{D_{obtenida}}{D_{esperada}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

$$WSA_{red} = \frac{\sum WSA_{nodos}}{N_{nodos}} \quad (3.3)$$

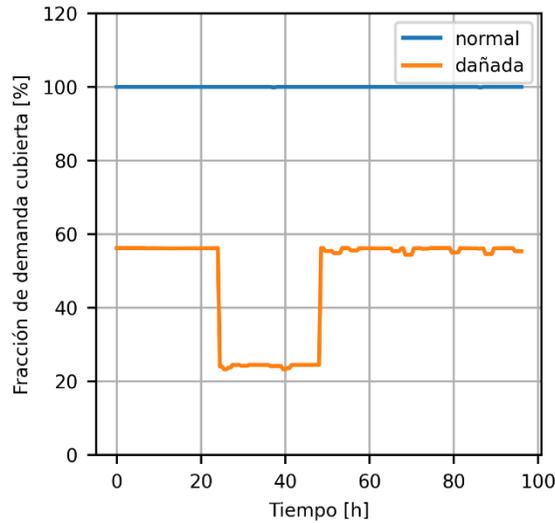


Figura 3.6: Ejemplo de WSA de red en el tiempo, afectada por amenazas.

3.2.2. Cumplimiento de presión mínima y requerida

Estas dos métricas cuantifican qué porcentaje de los resultados de presión en los nodos de la red para un tiempo determinado son mayores o iguales a los valores de presión mínima (5 [mca]) y presión requerida (15 [mca], presión mínima normativa). Se espera que este porcentaje disminuya con la severidad del efecto de una amenaza sobre la red. La presión obtenida a partir de las simulaciones es un resultado obtenido de WNTR que se procesa con las ecuaciones (3.4) y (3.5). En la Figura 3.7 se presenta como ejemplo un mapa donde los nodos de la red coloreados de rojo representan un resultado de presión promedio menor a la presión requerida.

$$\%P_{req} = \frac{N_{nodos}(P_{obtenida} \geq 15 [mca])}{N_{nodos}} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

$$\%P_{min} = \frac{N_{nodos}(P_{obtenida} \geq 5 [mca])}{N_{nodos}} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

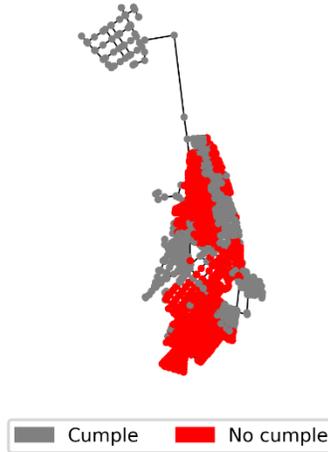


Figura 3.7: Mapa de incumplimiento de presión mínima normativa.

3.2.3. Métrica Económica

La métrica económica se obtiene en UTM considerando la cantidad de nodos en los que la presión promedio se encuentra bajo la presión mínima normativa, cuántos clientes se ven afectados por nodo y cuánto menor es la presión, con un límite de 1000 UTM. Esto se realizó en base a información de un procedimiento de sanción realizado por la SISS el año 2019, donde se multó a una cierta empresa un total 331 UTA al “incurrir en conductas que importan deficiencias en la calidad del servicio de distribución de agua potable, asociado a la presión mínima del servicio”, información que se utilizó para generar la Figura 3.8 y determinar la relación presentada en la ecuación (3.6). Se considera que cada nodo será un cliente para la red y en el documento se detallan las mediciones promedio de 26 puntos de control de presión, de los cuales se utilizan 25 para llegar a la relación utilizada.

$$Multa_{nodo} = \begin{cases} 1.2863 \cdot \frac{N_{clientes\ afectados} \cdot 15[mca]}{P_{promedio_{nodo}}} + 6.0255, & \text{si } P_{promedio_{nodo}} < 15[mca] \\ 0, & \text{si } P_{promedio_{nodo}} \geq 15[mca] \end{cases} \quad (3.6)$$

$$Multa_{red} = \sum Multa_{nodo} \quad (3.7)$$

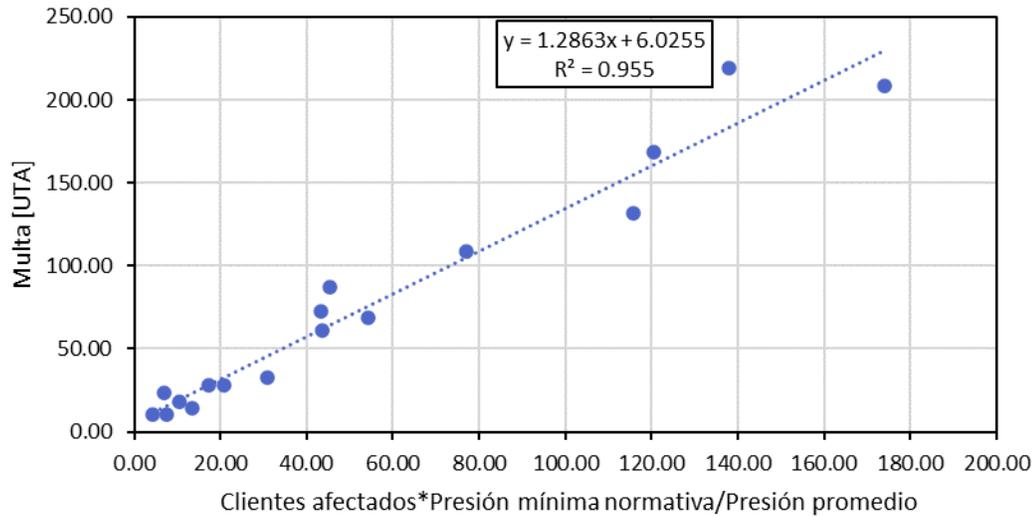


Figura 3.8: Relación utilizada para caracterizar la métrica económica.

3.3. Caracterización de escenarios de amenaza

En este trabajo se busca simular el efecto de distintas amenazas sobre el comportamiento hidráulico de una red. Para esto, se modela probabilísticamente el comportamiento de tres amenazas: amenaza sísmica, de deterioro, y de incendio debido a sismo (Fire Following Earthquake o FFE). Los resultados de estos modelos probabilísticos se agruparán como escenarios de cada amenaza, para más adelante evaluar el efecto de estos escenarios sobre la red. La Figura 3.9 indica cómo se realizará la obtención de estos escenarios, donde resalta que los escenarios de FFE dependerán directamente de los escenarios de amenaza sísmica, mientras que los de deterioro serán independientes.

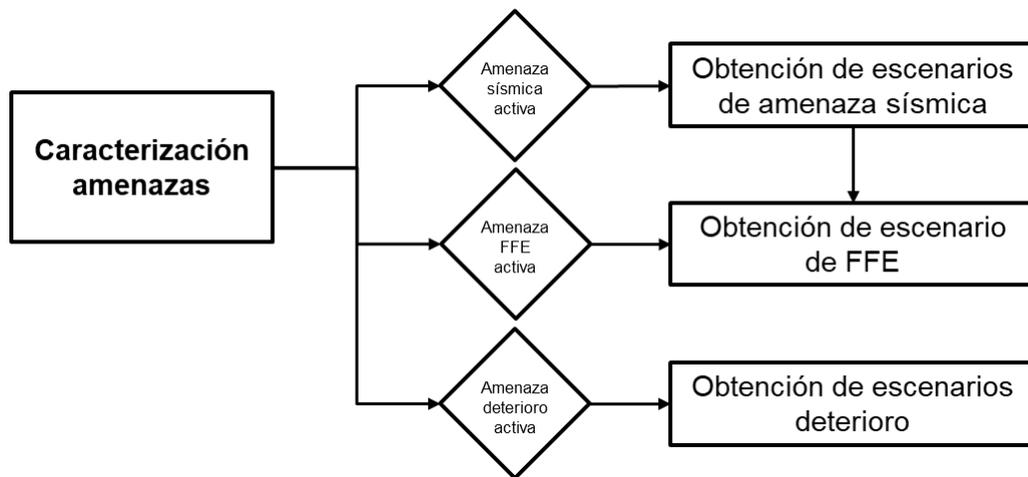


Figura 3.9: Caracterización de amenazas.

3.3.1. Amenaza Sísmica

Chile es un país sísmico y eventos telúricos de distintas magnitudes ocurren a lo largo de todo el país. Debido a esto, es imposible desprender cualquier análisis de infraestructura crítica de la amenaza sísmica, considerando que cualquier estructura que vaya a estar instalada décadas en el país deberá enfrentarse a movimientos de suelo de un nivel que se ve en pocos otros lugares del mundo. Las redes de distribución de agua potable no son una excepción, por lo que asegurar la continuidad de este servicio durante situaciones de emergencia es una necesidad.

Para caracterizar la amenaza sísmica se decide seguir una metodología similar a la de un análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA), donde se busca cuantificar las incertidumbres entorno a la ubicación, magnitud e intensidad de movimiento de futuros sismos que pueden ocurrir en un sitio (Baker, 2013). Esta metodología permite determinar una curva de amenaza, la que relaciona una tasa de excedencia anual con medidas de intensidad sísmica para todos los posibles escenarios sísmicos. La curva de amenaza se puede combinar con una curva de fragilidad o una función de vulnerabilidad para determinar probabilidades de falla de las tuberías de la red, lo que se utilizará más adelante para estimar el efecto de esta amenaza.

Se considera para el análisis a la ciudad de Valparaíso y todos los sismos de magnitud mayor a M_w 6.5 que han ocurrido desde 1950 en un radio de 200 [km] desde la ciudad. En base a datos recopilados desde la USGS, se determina los parámetros de la Tabla 3.1 que serán utilizados en el análisis probabilístico. Los sismos utilizados para el catálogo se presentan en la Figura 3.10.

Tabla 3.1: Resumen de parámetros históricos de sismos entorno a Valparaíso.

M_{min} [-]	M_{max} [-]	R_{min} [km]	R_{max} [km]	R_{mean} [km]	R_{cov} [-]	Z_{mean} [km]
6.5	8.3	32	198	111	0.4834	32

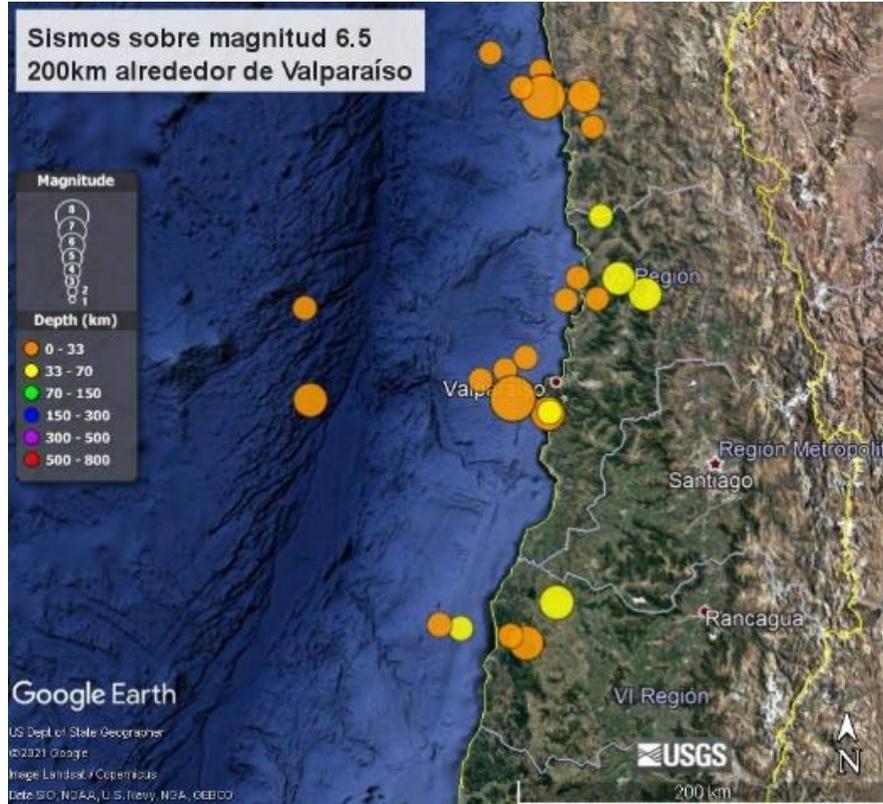


Figura 3.10: Catálogo de sismos utilizado. (USGS, 2021).

Estos datos se utilizan en conjunto con los valores propuestos por Poulos et al. (2019) para ser aplicados en la Ley de Gutenberg-Richter (G-R) en Chile. En el trabajo de Poulos et al. se presentan los parámetros de G-R $a=5.36$ y $b=0.88$ para la zona en la que se encuentra la ciudad de Valparaíso.

Se realizan muestreos de magnitud y radio utilizando MonteCarlo con el método de aceptación y rechazo. El muestreo de radios se realiza utilizando una distribución beta cuyos parámetros de forma están asociados a los radios presentados en la Tabla 3.1. Para el muestreo de magnitudes se utiliza la función de densidad de probabilidad (PDF) derivada de la ley de G-R (Baker, 2013) dada por la ecuación (3.8). En la Figura 3.11 y la Figura 3.12 se presentan los resultados de análisis de MonteCarlo para la obtención de magnitudes de momento y radios.

$$f_M(m) = \frac{b \ln(2.10) 10^{-b(m-m_{min})}}{1 - 10^{-b(m_{max} - m_{min})}}, \quad m_{min} < m < m_{max} \quad (3.8)$$

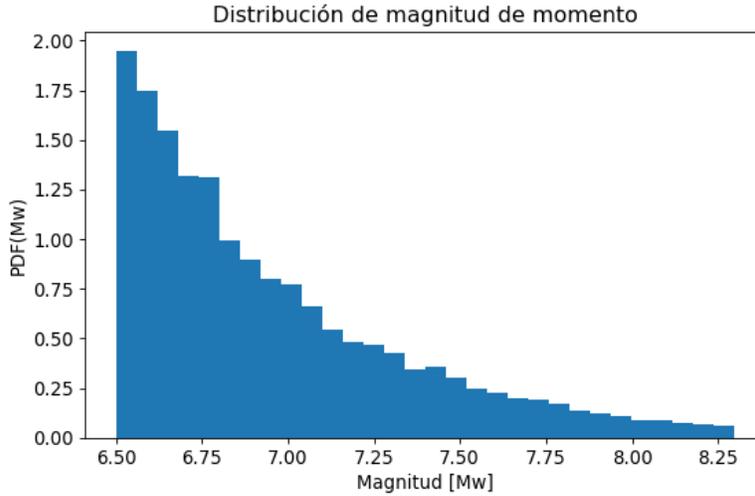


Figura 3.11: Distribución de magnitud de momento a partir de análisis de MonteCarlo.

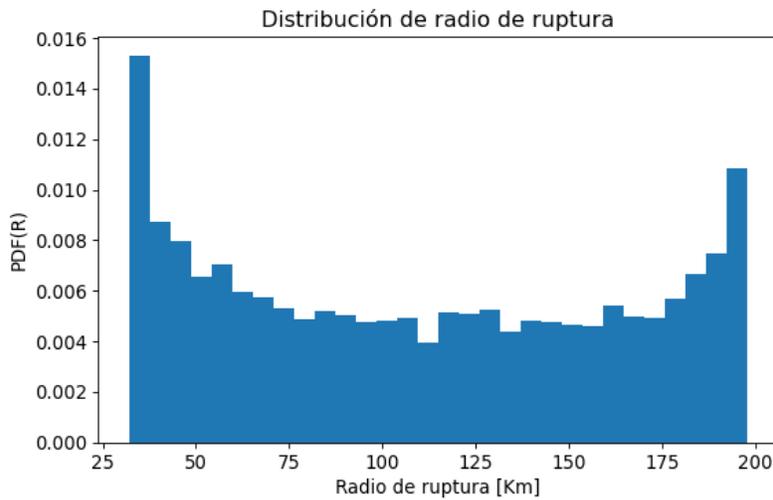


Figura 3.12: Distribución de radio hipocentral a partir de análisis de MonteCarlo.

Utilizando este muestreo, se obtienen 10 mil pares de magnitud y radio, cada cual se le entrega a una ecuación de predicción de movimiento de suelo (GMPE) determinada, la cual permite determinar un valor de medida de intensidad (IM) para cada par: Se implementó el uso de distintas ecuaciones de predicción de movimiento (GMPE), resumidas en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2: GMPE implementadas en el trabajo.

GMPE	IM obtenida
Idini et, al. 2017	PGA
Montalva et, al. 2017	PGA
Bastías et, al. 2018	PGV

Para un análisis simplificado, se trabajó considerando que todas las tuberías de la red se encuentran en zonas con mismas propiedades de suelo. Esto simplifica el análisis debido a que en una situación así la evaluación de los pares M y R en las GMPE entregaría una distribución única de IM, mientras que en el caso más cercano a la realidad, donde las propiedades de terreno pueden variar dentro de la red, la evaluación en GMPE entregaría tantas distribuciones de IM como tuberías hay en la red. Este caso más complejo también fue implementado, pero los análisis de los casos de estudio fueron hechos con la metodología simplificada. De este proceso se obtiene una distribución de IM como la presentada en la Figura 3.13.

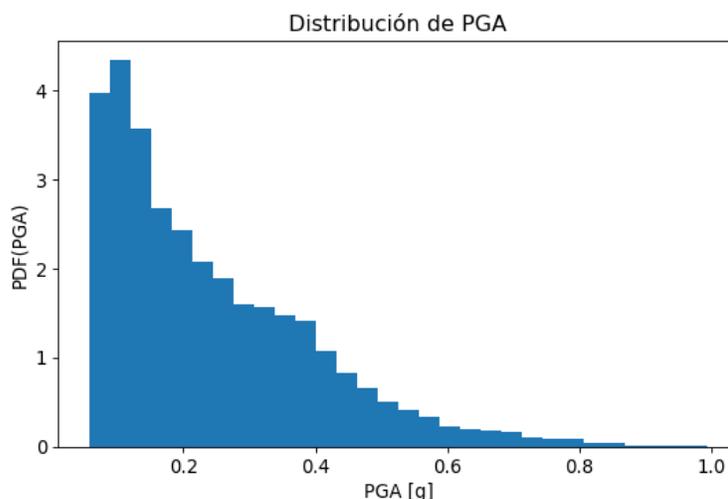


Figura 3.13: Distribución de PGA obtenida a partir de GMPE de Idini et al. (2017).

En la Figura 3.14 se presenta el efecto de considerar el parámetro V_{S30} según la implementación simplificada y la implementación más compleja. En la red de la Figura 3.14 a), se asignó a la red una distribución radial de V_{S30} con respecto al centro de la red. Esto se traduce a que el PGA de la red al evaluar las muestras de M y R en la GMPE de Idini et al. (2017) también crezca de forma radial con respecto al centro de la red, como se aprecia en la Figura 3.14 c). Por otro lado, a la red de la Figura 3.14 b) se le asignó los mismos parámetros a todas las tuberías de la red, por lo que el valor de PGA obtenido es igual en todas. Las diferencias entre la Figura 3.14 c) y la Figura 3.14 d) indican que utilizar la metodología simplificada podría subestimar el valor de IM en algunas tuberías y sobreestimarla en otras, pero cuando no se tiene información verificada de los parámetros de suelo alrededor de las tuberías, la metodología simplificada serviría como una buena primera aproximación. Además, dado que la metodología compleja requiere la evaluación en una GMPE de los parámetros de cada tubería para cada par M y R, el tiempo computacional requerido es significativamente mayor que en la metodología simplificada, por lo menos para esta parte de la implementación del marco multi-amenaza.

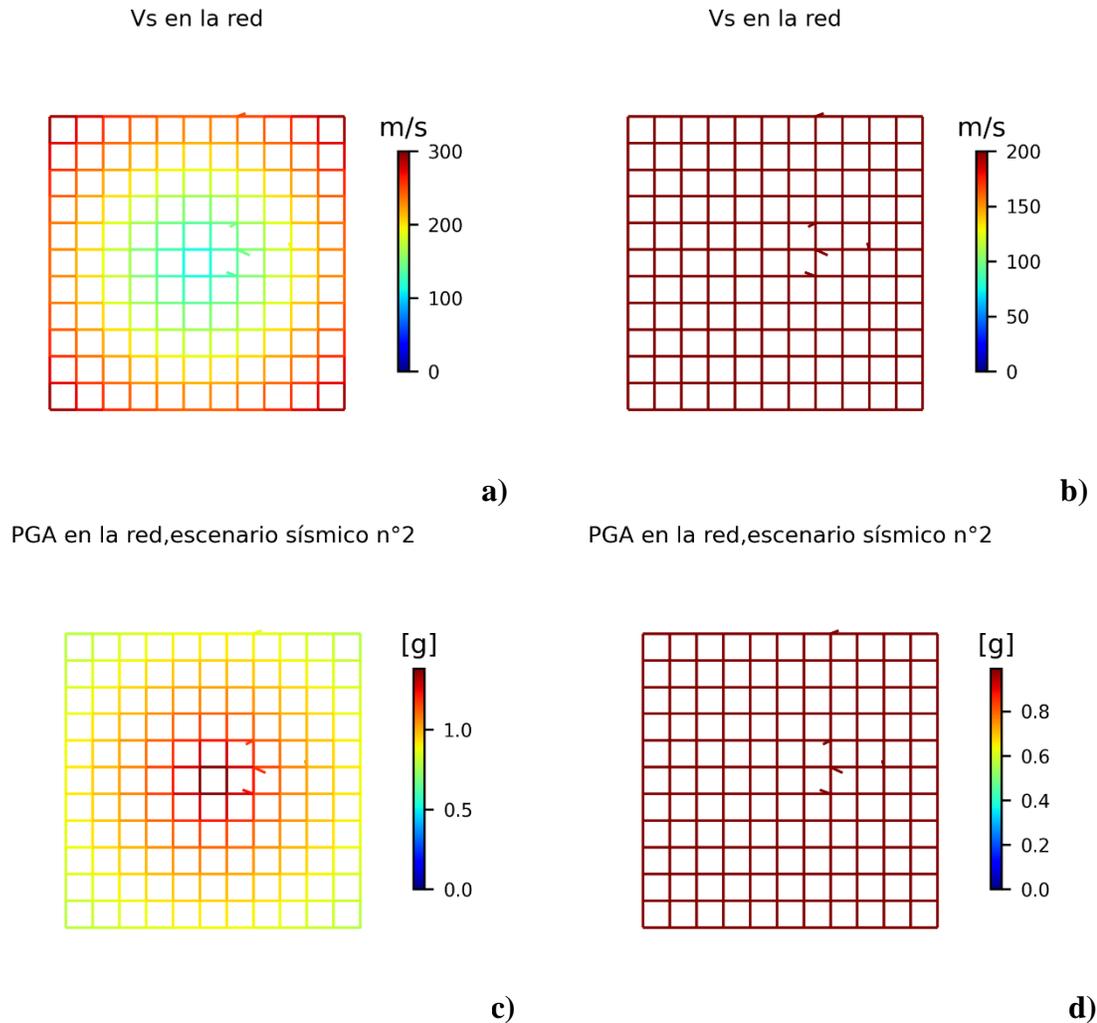


Figura 3.14: Efecto de la distribución espacial de Vs30 en las IM de las tuberías de la red.

Cada muestra de IM está asociada a un par magnitud-radio. Se obtiene la probabilidad de superar un cierto valor de IM como la suma de la cantidad de valores iguales o mayores a ese IM dentro de las muestras dividido en la cantidad total de muestras, ecuación (3.9).

$$P(IM_i > x | R_i, M_i) = \frac{\sum_{j=1}^n (IM_j \geq x | R_j, M_j)}{n} \quad (3.9)$$

Por otro lado, se calcula una tasa anual de excedencia de un valor de magnitud para cada muestra en base a la ley de G-R y se determina así que la tasa de excedencia anual de un cierto valor de IM está dada por la ecuación (3.10).

$$\lambda(IM > x) = \lambda_{G-R}(M) \cdot P(IM \geq x|R, M) \quad (3.10)$$

De esta manera, se genera una curva que muestra la tasa de excedencia anual de cada valor de IM para el análisis, la cual se denomina curva de amenaza. La curva de amenaza se obtuvo considerando 10 mil escenarios sísmicos (línea azul en Figura 3.15), pero para reducir el tiempo computacional del análisis sólo muestrean 20 puntos de esta que incluyan el primer y último punto de la curva de amenaza (puntos en rojo en Figura 3.15).

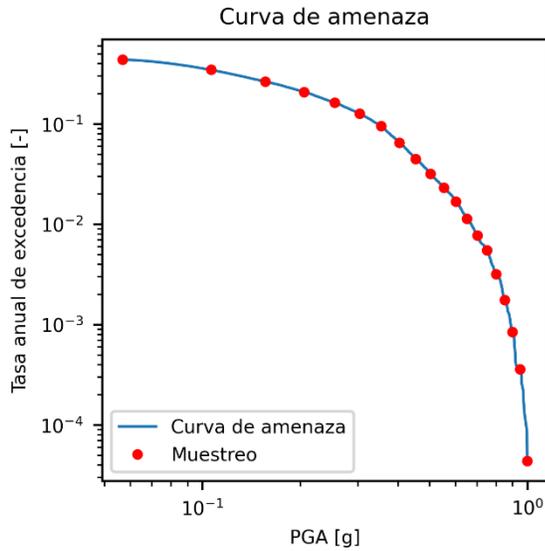


Figura 3.15: Curva de amenaza muestreada.

Un escenario sísmico corresponderá a uno de estos puntos muestreados de la curva de amenaza, es decir, un par IM y tasa anual de excedencia. La forma de obtener estos escenarios sísmicos se presenta resumida en el diagrama de flujo de la Figura 3.16.

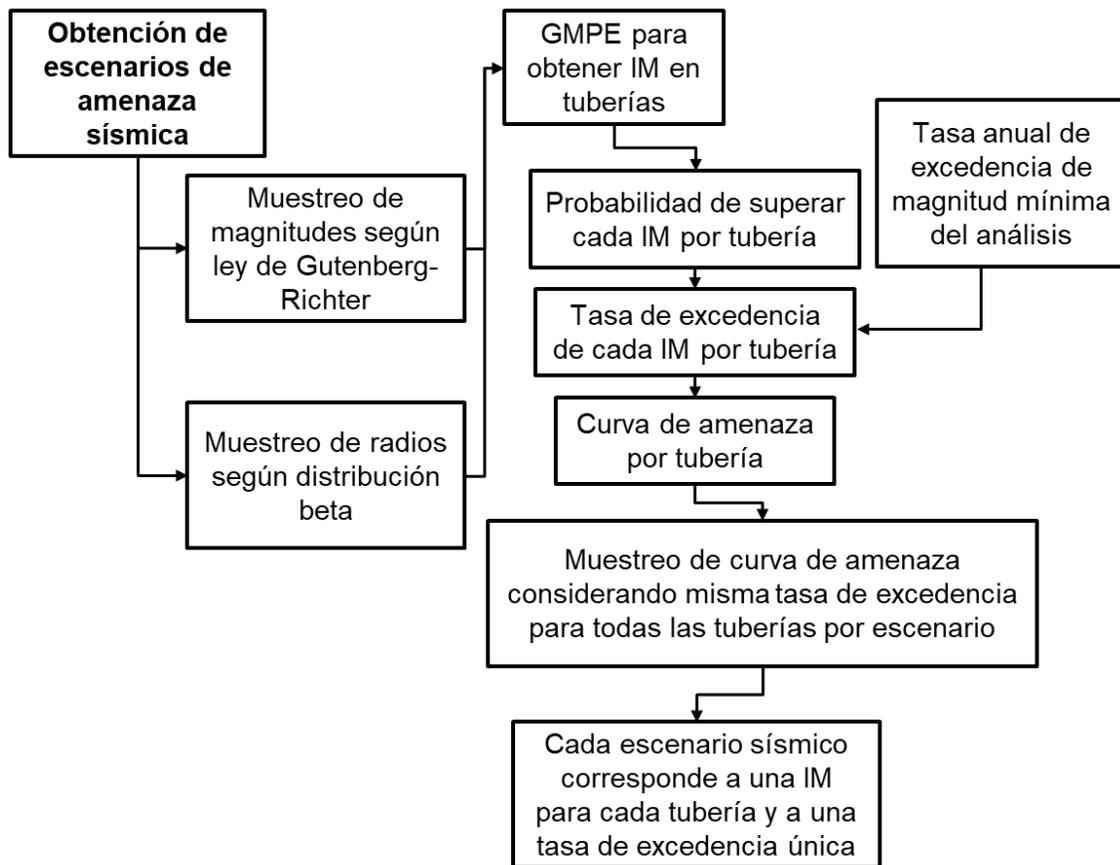


Figura 3.16: Obtención de escenarios de amenaza sísmica.

3.3.2. Amenaza Deterioro

De manera de asegurar la continuidad de la distribución de agua potable, los elementos de su red deben mantenerse en funcionamiento durante períodos de años. En el tiempo, cualquier elemento es capaz de verse afectado por distintas circunstancias que resulten en el deterioro de estos, ya sea debido a desgaste por su funcionamiento continuo, efectos de cambios de presión, o situaciones que ocurran físicamente en los alrededores, como construcciones u otros eventos antropogénicos. Además de esto, la parte de la red que se encuentra enterrada bajo suelo puede permanecer con daños que no puedan verse a menos que se realice una inspección profunda, pero que podrían eventualmente afectar al correcto funcionamiento de la red.

Para caracterizar la amenaza de deterioro de las tuberías de la red, se decide utilizar una metodología donde la probabilidad de falla de los elementos viene asociada a un crecimiento exponencial de la tasa de falla que existe hasta un cierto periodo. Se asumirá para simplificar el análisis que todas las tuberías de la red fueron instaladas hace una misma cantidad de años y que hasta el momento actual ha habido una cierta cantidad $N(t_0)$ de fallas por kilómetro. Se considerará que esta tasa de falla es representativa de la red completa, independiente de los diámetros, tipo, o

material de las tuberías. Si bien este es un modelo simplificado, se considera como una buena primera aproximación para mostrar el efecto de deterioro en el tiempo.

Se utiliza una tasa histórica de fallas por kilómetro en la red hasta el tiempo de estudio t_0 , la cual se denomina $N(t_0)$, para extrapolar el número de fallas por kilómetro esperadas para un año t en base a una hipótesis de crecimiento exponencial. Se considera el modelo de Shamir y Howard (1979) dado por la ecuación (3.11), donde A es un coeficiente de envejecimiento que puede tomar valores entre 0.01 y 0.15. En el trabajo de Piratla & Ariaratnam (2011) se utilizan valores de 0.02 y 0.08 para comparar resultados, pero se indica que otros autores han propuesto usar un valor de 0.02.

$$N(t) = N(t_0)e^{A(t-t_0)} \quad (3.11)$$

Este número de fallas por kilómetro transforma a una tasa anual de fallas por kilómetro considerando la ecuación (3.12).

$$r(t) = \frac{N(t)}{t - t_0} \quad (3.12)$$

Con esto, la probabilidad de falla de cada tubería se obtiene en base al modelo de Poisson propuesto por Su et al. (1987), utilizando la ecuación (3.13), donde se considera el largo de cada tubería L_j y el número de fallas por kilómetro por año r_j .

$$P = 1 - e^{-(r_j L_j)} \quad (3.13)$$

La tasa de falla por kilómetro a ciertos valores de año de instalación se puede apreciar en la Figura 3.17, ilustrando el efecto de este crecimiento exponencial para un coeficiente de envejecimiento de 0.3. La probabilidad de falla promedio por tubería en la red se ilustra en la Figura 3.18, siendo un caso en que la amenaza de deterioro afectaría a gran parte de la red.

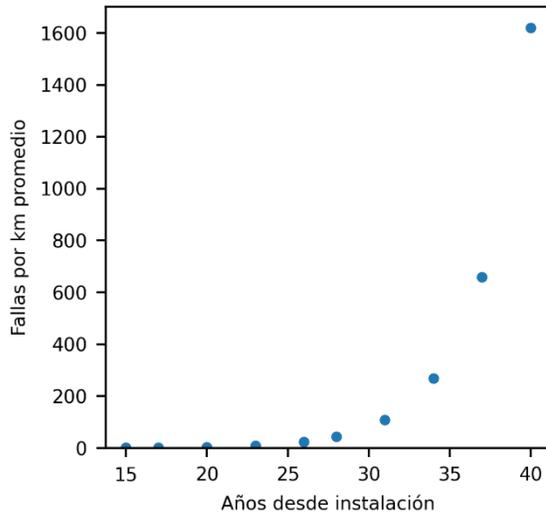


Figura 3.17: Ejemplo de tasa de falla por kilómetro promedio en la red.

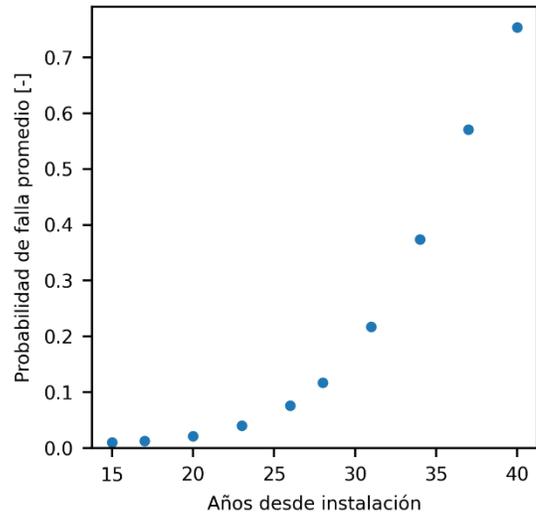


Figura 3.18: Ejemplo de probabilidad de falla promedio en la red.

Los escenarios de deterioro serán los conjuntos de cada año de análisis junto a la probabilidad de falla de cada tubería de la red para ese año. El procedimiento se encuentra resumido por el diagrama mostrado en la Figura 3.19.

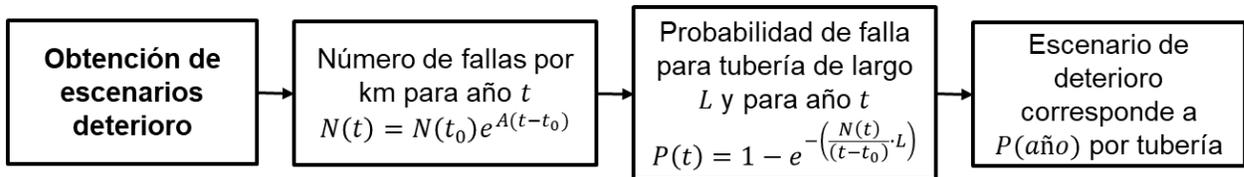


Figura 3.19: Obtención de escenarios de deterioro.

3.3.3. Amenaza de incendio posterior a sismo o FFE.

La tercera y final amenaza a implementar en este trabajo es la amenaza de incendio luego de ocurrencia de sismo (Fire Following Earthquake o FFE). Se considera esta amenaza dada su dependencia de los escenarios sísmicos y su impacto directo sobre la red de agua. La ocurrencia de incendios cuando se está lidiando con posibles bajas de presión debido al daño ocasionado por eventos sísmicos es capaz de empeorar situaciones difíciles, por lo que es interesante cuantificar el efecto de estas grandes demandas impuestas en ciertos nodos de la red.

Se utiliza la metodología propuesta por Zhao et al. (2006), y descrita en Li et al. (2019), donde se define la probabilidad de ocurrencia de un número de incendios en nodos de la red en base al PGA experimentado durante el evento sísmico. Esta metodología está basada en análisis estadístico donde se evidencia la tendencia a un aumento de incendios luego de eventos sísmicos, y su eventual disminución a medida que pasa el tiempo. Para comenzar el análisis, se considera un modelo de

regresión para la probabilidad de que un incendio ocurra por 100,000 m^2 de área construida dado un valor de PGA en g, expresado en la (3.14).

$$\lambda_f = 0.0042 + 0.5985 \cdot PGA \quad (3.14)$$

Como se necesita el valor de PGA por nodo, se considera el promedio del PGA de todas las tuberías que llegan a un mismo nodo, el que se usa para determinar el valor de λ_f . La probabilidad de que ocurra un incendio en un cierto nodo estará dada por la ecuación (3.15), donde s es el área construida en 100,000 m^2 .

$$\lambda_n = \lambda_f \cdot s \quad (3.15)$$

Para estimar su valor, se toma el valor de metros cuadrados por habitante asociado a la comuna y se multiplica por el número de habitantes por nodo. En el estudio de Li se tenían 2314 nodos de demanda para una zona de 600 mil habitantes, por lo que para este estudio se consideró inicialmente 200 habitantes por nodo, lo que se aumentó a 2000 habitantes por nodo para ilustrar de mejor manera el comportamiento de esta amenaza.

Si no se considera la posibilidad de que se propague un incendio de un nodo a otro, la probabilidad de que ocurra un FFE en cada nodo es independiente. En base a esto, la probabilidad de que un cierto número de incendios ocurra en un cierto nodo se calcula en base a una distribución de Poisson:

$$P(N_s = n) = \frac{(\lambda_n)^n}{n!} e^{-\lambda_n} \quad (3.16)$$

Dado que la probabilidad de que ocurran más de tres sismos es muy pequeña, se desestima en el estudio y se recomienda sólo considerar el efecto de 0 a 3 incendios por nodo. Se calcula la probabilidad de ocurrencia de 1, 2 y 3 incendios, y se toma la probabilidad de 0 incendios como el complemento. En la Figura 3.20 se aprecia el crecimiento de las distintas probabilidades promedio de número de incendios en los nodos de una red. La probabilidad de cada número de incendios aumenta con el valor de PGA en el rango evaluado, mientras que el complemento decrece. Este conjunto de probabilidades por cada nodo se considera como un escenario de FFE, dependiente de un escenario sísmico con un cierto PGA. El procedimiento se resume en la Figura 3.21.

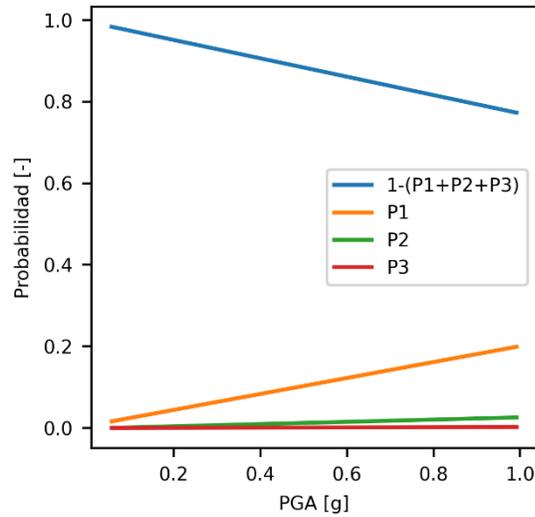


Figura 3.20: Probabilidad de número de incendios promedio en nodos de la red.

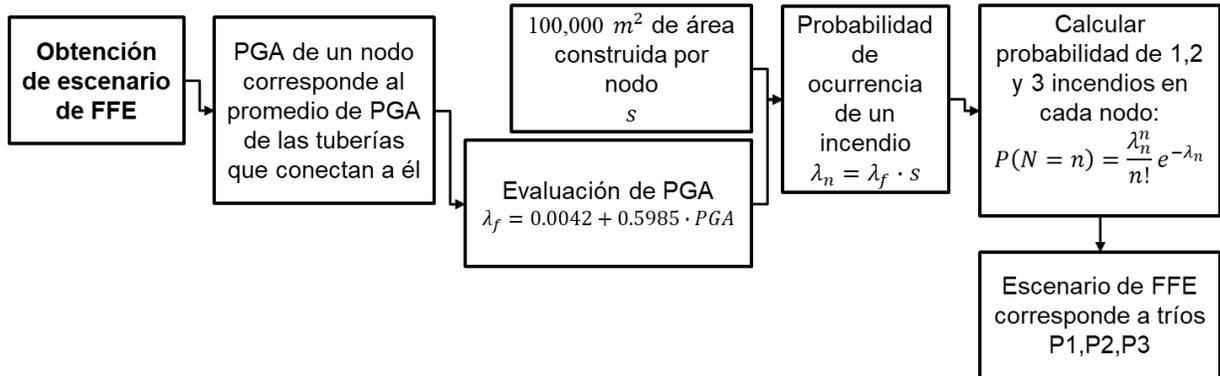


Figura 3.21: Obtención de escenarios de FFE.

Para estimar parámetros s que sean válidos para Chile, se utilizó una combinación de datos presentados por miembros del Banco Central de Chile y resultados del Censo 2017. En el documento formulado por Flores et al. (2018), se presentan estimaciones de metros cuadrados construidos de casas y departamentos para el año 2017 para las zonas Norte, Sur y Centro de Chile, sin incluir a la Región Metropolitana, ya que se realiza también una separación de esta en RM Centro, Poniente, Oriente y Sur (Tabla 3.3). La denominación de las regiones se realizó en base a sus números y sin considerar a la región de Ñuble, la cual se separó de la región del Bío-Bío durante el año 2018.

Tabla 3.3: Definición de zonas geográficas utilizadas en el estudio de Flores et al. (2018).

Norte	XV I II III	RM Centro	Santiago Recoleta Independencia	
		Centro	IV V VI VII	RM Poniente
Sur	VIII IX XV XI XIV XII			RM Poniente
		RM Oriente	Pudahuel	
RM Sur			RM Oriente	Renca
		RM Sur		
RM Sur			RM Oriente	
		RM Sur		
RM Sur			RM Oriente	
		RM Sur		
RM Sur			RM Oriente	
		RM Sur		
RM Sur			RM Oriente	
		RM Sur		
RM Sur			RM Oriente	
		RM Sur		
RM Sur			RM Oriente	
		RM Sur		
RM Sur			RM Sur	
		RM Sur		
RM Sur			RM Sur	
		RM Sur		
RM Sur			RM Sur	
		RM Sur		
RM Sur			RM Sur	
		RM Sur		

En el Censo Nacional de Población y Vivienda del año 2017 (INE, 2018) se logró caracterizar sobre 17 millones de personas en el territorio nacional, donde la distribución por regiones se presenta en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Población por región, Censo 2017 (INE,2018).

Código	Región	Población total
0	País	17,574,003
15	Arica y Parinacota	226,068
1	Tarapacá	330,558
2	Antofagasta	607,534
3	Atacama	286,168
4	Coquimbo	757,586
5	Valparaíso	1,815,902
13	Metropolitana	7,112,808
6	O'Higgins	914,555
7	Maule	1,044,950
16	Ñuble	480,609
8	Biobío	1,556,805
9	La Araucanía	957,224
14	Los Ríos	384,837
10	Los Lagos	828,708
11	Aysén	103,158
12	Magallanes	166,533

En base a los datos de metros cuadrados construidos por zona del documento del Banco Central y los datos de población por región, es posible realizar una estimación de metros construidos por habitante, presentada en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Estimación de metros cuadrados de vivienda por habitante en distintas zonas del país.

	Millones de m ² de Construcción al año 2017	Población por zona al año 2017	m ² construidos por habitante
ZONA NORTE	26.8	1,450,328	18.479
ZONA CENTRO	97.7	4,532,993	21.553
RM CENTRO	14.9	662627	22.486
RM ORIENTE	53.8	1654207	32.523
RM PONIENTE	45.4	2655226	17.098
RM SUR	38.1	2140748	17.798
ZONA SUR	79.1	4,477,874	17.665
Total País	355.7	17,574,003	20.240

Con estos valores y la población de un sector, es posible estimar el número de metros cuadrados construidos en tal sector, los que se pueden utilizar como estimación del parámetro s para los nodos del sector.

4.Marco de análisis multi-amenaza

Existen distintas formas de realizar análisis de riesgo multi-amenaza. En este trabajo, se decide caracterizar las amenazas de manera probabilística, obteniendo distintos escenarios de amenaza para cada una. Es posible determinar el efecto de un escenario de amenaza sobre la red utilizando modelos y luego simular la red numéricamente con modificaciones con base en tales efectos, pero al tener más de una amenaza actuando de forma simultánea, es necesario tener una metodología que permita determinar qué escenarios de cada amenaza analizar simultáneamente y cómo esto afectará a la red.

Las amenazas que pueden afectar a un sistema no siempre van a actuar de forma independiente y considerarlas por sí solas en análisis puede llevar a subestimar el nivel real de peligro sobre la infraestructura. Evaluar distintas amenazas que actúan en conjunto presenta distintas dificultades, dentro de las cuales la principal es que la ocurrencia y consecuencias de cada amenaza puede ser descrita por distintos criterios, por lo que unificar sus efectos sobre el sistema no es un proceso directo.

El marco multi-amenaza presentado en este trabajo toma como primer supuesto que las amenazas van a actuar dentro del tiempo del análisis hidráulico. Como segundo supuesto, se trabaja considerando que el efecto de los escenarios de cada amenaza sobre la red puede ser cuantificado de manera independiente. Por ejemplo, se considera que la curva de fragilidad de las tuberías de la red no depende del estado de deterioro de estas, por lo que la probabilidad de que una tubería presente un cierto estado de daño debido a un escenario sísmico se puede calcular de forma independiente de los escenarios de deterioro. Este supuesto se realiza sólo por la falta de un modelo que adecuado que pudiese tomar tal consideración. Dados estos supuestos, luego de caracterizar los escenarios de amenaza se procede a determinar el efecto que cada escenario de amenaza individual tendría sobre la red. Estos efectos serán el estado de daño de cada tubería para los escenarios sísmicos, qué tuberías presentan falla por deterioro, y cuántos incendios se presentarán en cada nodo de la red.

Teniendo el efecto de los distintos escenarios de amenaza individuales, se procede a generar los escenarios de multi-amenaza, que estarán definidos para todas las combinaciones de amenazas independientes posibles. Por ejemplo, el deterioro de los elementos de un sistema por corrosión es independiente de la ocurrencia de un sismo, por lo que estas amenazas serían independientes. Por otro lado, un tsunami ocurre debido a la ocurrencia de un sismo, por lo que cada escenario de amenaza de tsunami está relacionado a un escenario de amenaza sísmica, lo que clasificaría a estas amenazas como dependientes.

Dado que los escenarios de FFE son dependientes a los escenarios sísmicos, se consideran como una amenaza conjunta equivalente, que es independiente de la amenaza deterioro. Así, para determinar los escenarios multi-amenaza se itera sobre todos los escenarios sísmicos y de FFE para un mismo escenario de deterioro. Durante esta iteración, se determina los periodos de la simulación en los que actuará cada amenaza, proceso llamado temporalidad. Al terminar esta iteración, se pasa al siguiente escenario de deterioro, hasta que no queden más escenarios de esta amenaza y se haya determinado todos los escenarios multi-amenaza con su temporalidad.

El proceso completo de determinación de escenarios multi-amenaza y temporalidad se resume en la Figura 4.1, y será explicado en la sección 4.1 siguiente donde se detallará cómo se cuantifican los efectos de cada amenaza, y cómo se realiza el proceso de determinar temporalidad.

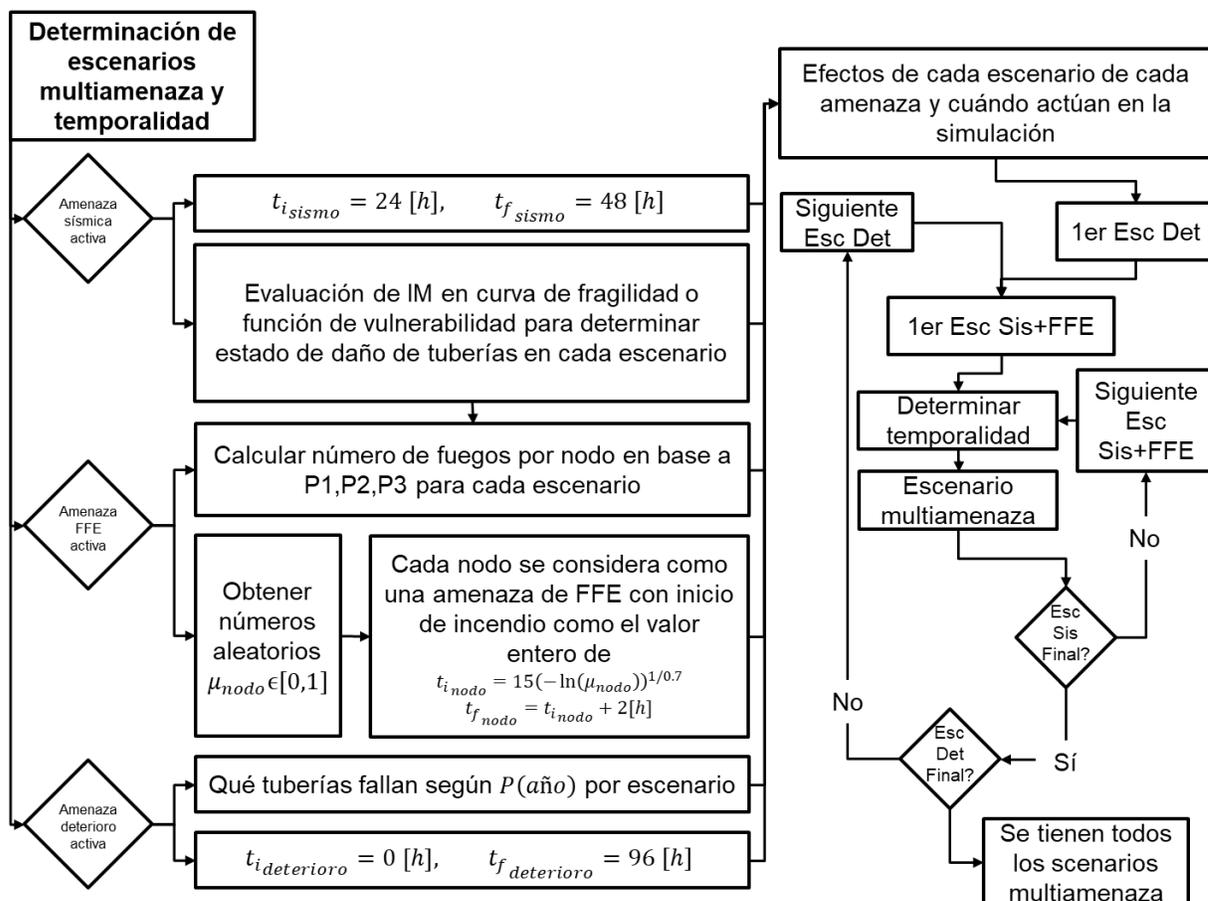


Figura 4.1: Determinación de escenarios multi-amenaza y temporalidad.

El siguiente paso será traducir los efectos de las amenazas a una cantidad de daño en la infraestructura, de manera que se pueda realizar simulaciones sobre esta en un estado perturbado por las amenazas. Dado un escenario multi-amenaza, para determinar su daño será necesario tener un modelo que permita estimar cómo el daño que provocaría el elemento de cada amenaza podría

verse afectado por las otras amenazas. Es importante tomar esta consideración debido a que el daño sobre un elemento no es necesariamente la suma de los daños que cada amenaza, si no que a priori podría existir cualquier tipo de relación, ya sea multiplicativa, exponencial, o de cualquier otro tipo. La correcta caracterización de la relación de daño entre amenazas podría llevar a resultados que reflejen de mejor manera la realidad. Sin embargo, en este trabajo se decide realizar un análisis simplificado, donde el daño de las amenazas estará caracterizado como área de fuga en los nodos de la red. Aún más, se considera para la implementación que el daño será aditivo, por lo que luego de traducir los efectos de las amenazas en las tuberías y nodos de la red, se asignará un valor de daño por cada amenaza a cada elemento y luego se integrarán todos estos valores en los nodos del sistema. Este proceso se ve resumido en la Figura 4.2 y será detallado en la sección 4.2.

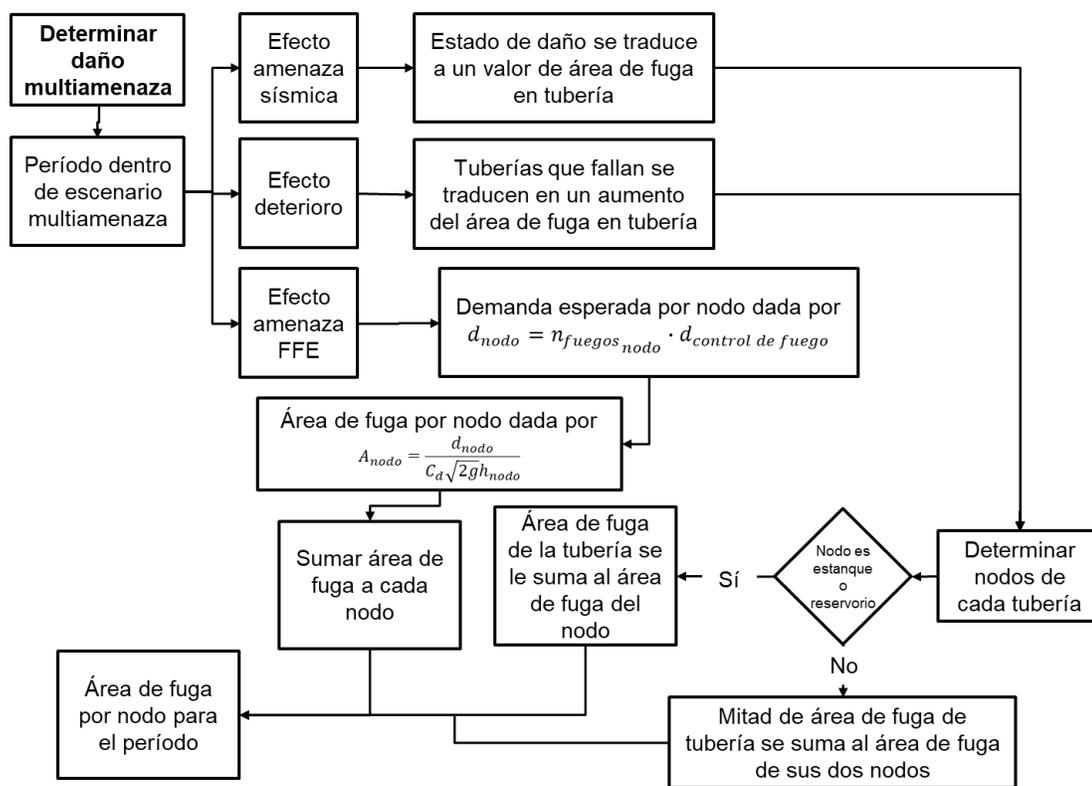


Figura 4.2: Determinación de daño multi-amenaza.

4.1. Determinación de escenarios multi-amenaza y temporalidad

4.1.1. Sismo

Para determinar los efectos de los distintos escenarios sobre la red, se utilizan dos metodologías para traducir las IM de cada tubería a una probabilidad de falla o de estado de daño. Si la IM es PGA se utilizará una curva de fragilidad para determinar la probabilidad de que cada tubería presente un estado de daño nulo, moderado, o mayor, para cada escenario. Si la IM obtenida durante la caracterización es PGV, se utilizará una función de vulnerabilidad para determinar una tasa de falla por longitud que se transformará a una probabilidad de falla para cada tubería, para cada escenario. Una vez determinadas estas probabilidades, se determinará aleatoriamente cuáles tuberías serán afectadas por la amenaza sísmica en cada escenario.

En el caso en que la IM utilizada es la máxima aceleración de suelo (PGA), se obtiene una probabilidad de presentar un cierto estado daño en base al valor de PGA a través de una curva de fragilidad. La curva de fragilidad utilizada es la desarrollada por Garvs (2020) para tuberías de asbesto-cemento, material que compone el 40.4% de los elementos de las redes de agua potable en Chile (SISS, 2018) y mostrada en la Figura 4.3.

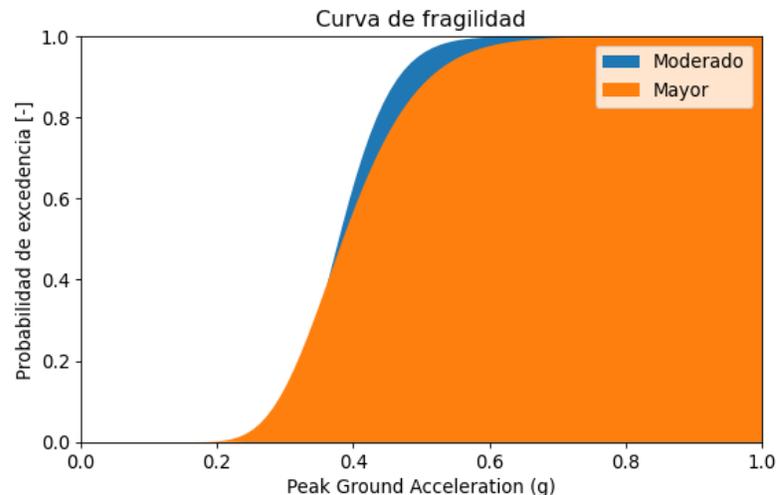


Figura 4.3: Curva de fragilidad para tuberías de asbesto-cemento (Garvs,2020).

Cuando la IM es la velocidad máxima de terreno (PGV), se calculan primero las reparaciones por kilómetro ante el valor de PGV a través de una función de vulnerabilidad, lo que se interpreta como una tasa de fallas por kilómetro esperada y se utiliza para determinar una probabilidad de falla para cada tubería en base a su largo. La curva de vulnerabilidad utilizada es la que se puede encontrar

en American Lifelines Alliance (2001), la cual se presenta en la ecuación (4.1), con RR el número de reparaciones por 1000 pies de tubería y PGV en pulgadas por segundo.

$$RR = 0.00187 \cdot PGV \quad (4.1)$$

El número de reparaciones se considera como un número de fallas y se utiliza una distribución de probabilidad de Poisson para calcular la probabilidad de falla de una tubería en base a su largo, presentada en la ecuación (4.2)

$$P_i = 1 - e^{-RR \cdot L_i} \quad (4.2)$$

Para cada escenario, se determina aleatoriamente qué tuberías presentarán fugas en base a la probabilidad de falla determinada. Este efecto se incluirá en los modelos de cada escenario multi-amenaza como fugas que actuarán desde el tiempo de ocurrencia hasta 24 horas después. Esta consideración se toma para simplificar la implementación, pero se podría haber considerado una cierta tasa de reparación con la cual se hubiese cerrado algunas fugas de la red de forma aleatoria a medida que pasa el tiempo.

4.1.2. Deterioro

En el caso de la amenaza de deterioro, se determina qué tuberías fallan utilizando directamente la probabilidad de falla de cada tubería obtenida en la caracterización de amenazas, para cada escenario. Se considerará que el efecto de deterioro se mantendrá durante toda la simulación hidráulica, por lo que parte en tiempo 0 horas, hasta el tiempo final de la simulación a las 96 horas.

4.1.3. Incendio posterior a sismo (FFE)

Dadas las probabilidades obtenidas, se determina aleatoriamente el número de incendios por nodo. Además, de acuerdo a lo descrito en Li et al. (2019), se considera que la hora de inicio t de un incendio dentro de la red se puede simular considerando la distribución presentada en la ecuación (4.3).

$$F(t) = 1 - e^{-(t/15)^{0.7}} \quad (4.3)$$

Se considera que todos los incendios en un mismo nodo comienzan en una misma hora y que los tiempos de inicio son valores enteros de horas. Utilizando un valor aleatorio entre 0 y 1 para cada nodo (μ_i) se calcula el tiempo de inicio del incendio considerando la ecuación (4.4), invertida de la ecuación (4.3).

$$t_i = 15(-\ln(\mu_i))^{1/0.7} \quad (4.4)$$

El hecho de que cada nodo pueda tener tiempos distintos de inicio de incendios tiene implicancias para el cálculo de temporalidad, presentado a continuación.

4.1.4. Determinación de Temporalidad

Dado que los efectos de las amenazas pueden comenzar y terminar en tiempos distintos durante la simulación y que para hacer cambios en las fugas del sistema se debe pausar la simulación hidráulica, es necesario tener una manera de decidir cuándo pausar y qué amenazas van a influenciar la simulación cuando se vuelva a continuar. En este trabajo, se denomina a este proceso “temporalidad” y la manera en la que se determina se resume en el diagrama de la Figura 4.4.

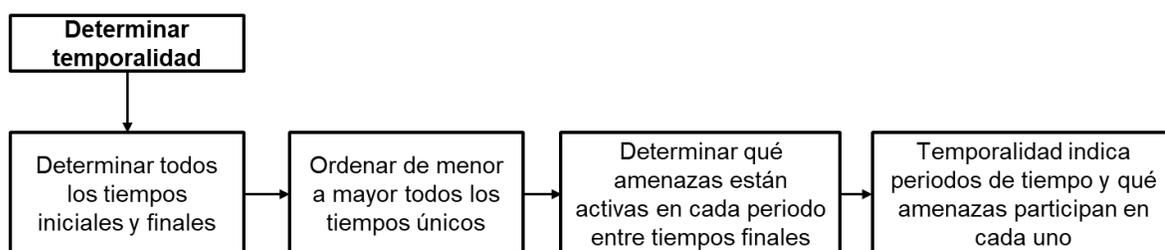


Figura 4.4: Determinación de temporalidad.

Para ilustrar la manera en la que se determina la temporalidad, se presenta el siguiente caso de ejemplo para un análisis multi-amenaza sísmico con deterioro (Tabla 4.1):

Tabla 4.1: Datos para ejemplo de determinación de temporalidad.

Tiempo de simulación	Amenaza sísmica		Amenaza deterioro	
	Tiempo inicial de efecto	Tiempo final de efecto	Tiempo inicial de efecto	Tiempo Final de efecto
96 horas	24 horas	48 horas	0 horas	96 horas

Se conocen los tiempos de inicio y término de los efectos de cada amenaza, y cuál es el tiempo total de simulación. A simple vista, la amenaza de deterioro actuará durante toda la simulación, mientras que la amenaza sísmica actuará sólo durante 24 horas dentro del tiempo de simulación

hidráulica. Esto implica que se tendrá un primer periodo donde sólo actuará la amenaza de deterioro, un segundo donde ambas amenazas actuarán en conjunto, y uno final donde nuevamente actuará sólo la amenaza de deterioro. Para determinar esto, se puede seguir el procedimiento descrito en la Figura 4.4. Ya que se tienen los tiempos iniciales y finales de todas las amenazas, se procede a ordenar todos los tiempos únicos importantes de la simulación de acuerdo a la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Tiempos únicos importantes de simulación.

Tiempo [hr]	Corresponde a
0	T_i amenaza deterioro y simulación
24	T_i amenaza sísmica
48	T_f amenaza sísmica
96	T_f amenaza deterioro y simulación

El siguiente paso es determinar qué amenazas estarán activas en cada periodo de tiempo entre estos tiempos únicos. Por ejemplo, en el primer periodo de 0 a 24 horas sólo estará activa la amenaza de deterioro, mientras que en el periodo entre 24 a 48 horas se activa la amenaza sísmica. Esto se traduce a una Tabla 4.3 donde se indica para cada periodo con 0 si la amenaza no está activa y con 1 si lo está.

Tabla 4.3: Amenazas activas por periodo de simulación.

Periodo [hr]	Amenaza sísmica	Amenaza deterioro
0 a 24	0	1
24 a 48	1	1
48 a 96	0	1

El valor asociado al efecto de cada amenaza será multiplicado por estos valores para activarlo o desactivarlo dependiendo de qué amenazas están presentes en el periodo, llevando a que el daño a los nodos de la red aportado por una amenaza inactiva sea nulo.

La amenaza FFE conlleva a una amenaza distinta por cada nodo, debido a que el tiempo de inicio del evento de un nodo se obtiene aleatoriamente. Esta consideración permite ilustrar que la implementación acepta cualquier número de amenazas, a costo de aumentar el tiempo computacional. Para ilustrar esto, se presentan las mismas tablas anteriores para una red hipotética que sólo tiene 3 nodos, donde todos los tiempos están en horas (Tabla 4.4, Tabla 4.5 y Tabla 4.6):

Tabla 4.4: Tiempos iniciales (T_i) y finales (T_f) de segundo ejemplo.

Simulación		Sismo		Deterioro		FFE Nodo 1		FFE Nodo 2		FFE Nodo 3	
$T_{i_{sim}}$	$T_{f_{sim}}$	$T_{i_{sis}}$	$T_{f_{sis}}$	$T_{i_{det}}$	$T_{f_{det}}$	$T_{i_{n1}}$	$T_{f_{n1}}$	$T_{i_{n2}}$	$T_{f_{n2}}$	$T_{i_{n3}}$	$T_{f_{n3}}$
0	96	24	48	0	96	24	26	25	27	28	30

Tabla 4.5: Tiempos únicos importantes de simulación.

Tiempo [hr]	Corresponde a
0	$T_{i_{sim}}, T_{i_{det}}$
24	$T_{i_{sis}}, T_{i_{n1}}$
25	$T_{i_{n2}}$
26	$T_{f_{n1}}$
27	$T_{f_{n2}}$
28	$T_{i_{n3}}$
30	$T_{f_{n3}}$
48	$T_{f_{sis}}$
96	$T_{f_{sim}}, T_{f_{det}}$

Tabla 4.6: Amenazas activas por periodo de simulación.

Periodo [hr]	Sismo	Deterioro	FFE Nodo 1	FFE Nodo 2	FFE Nodo 3
0 a 24	0	1	0	0	0
24 a 25	1	1	1	0	0
25 a 26	1	1	1	1	0
26 a 27	1	1	0	1	0
27 a 28	1	1	0	0	0
28 a 30	1	1	0	0	1
30 a 48	1	1	0	0	0
48 a 96	0	1	0	0	0

Como se ve, esta implementación permite agregar cualquier número de amenazas, pero cada amenaza extra con nuevos tiempos únicos incrementa significativamente el número de periodos de la simulación. El análisis hidráulico debe ser pausado al final de cada periodo para realizar los cambios de daño en la red, lo que impacta en el tiempo computacional necesario para realizar la simulación completa. El efecto de considerar temporalidad se puede apreciar en la Figura 4.5, donde se tiene una red con efecto de las tres amenazas combinadas. El primer periodo hasta las 24 horas presenta una disminución que se mantiene constante del WSA de la red dañada con respecto a la normal, dado que sólo está activa la amenaza de deterioro. A las 24 horas se activa la amenaza sísmica y existe posibilidad de incendios post sismo, por lo que se comienzan a ver perturbaciones

dadas por las distintas amenazas activas. La amenaza sísmica produce otra disminución significativa en el WSA, mientras que el efecto de FFE se puede notar más claramente cuando la amenaza sísmica se vuelve inactiva después de las 48 horas. Cabe notar que la amenaza de FFE no desaparece cuando se “desactiva” la amenaza sísmica.

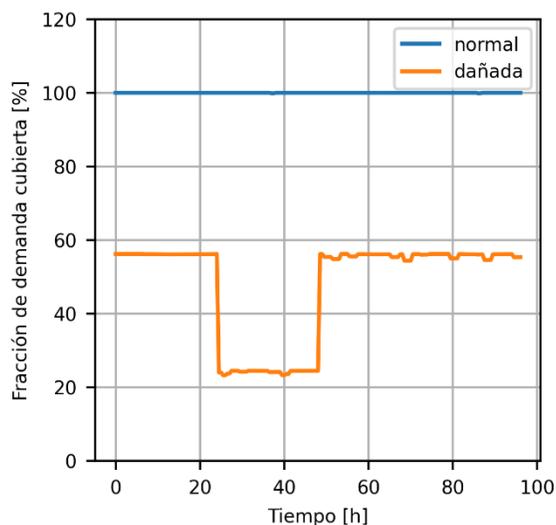


Figura 4.5: WSA en simulación, ejemplo de temporalidad.

4.2. Determinación de daño en escenarios multi-amenaza

De la etapa anterior, la información que se tiene para cada escenario multi-amenaza es el efecto de las amenazas individuales sobre la red y en qué momento de la simulación actúan. El paso siguiente es transformar este efecto en un área de fuga de los elementos de la red, una cantidad de daño. Para cada escenario de amenaza de un escenario multi-amenaza se calcula un valor de daño, el cual se utilizará posteriormente para modificar la red en los distintos periodos de análisis, donde el daño de las amenazas que no participan se multiplicará por cero y el de las que sí participan en el periodo, por uno.

En la implementación realizada se utilizó parámetros de daño arbitrarios, que permitan ilustrar los efectos de las amenazas sobre las distintas métricas de la red. En la Tabla 4.7 se resumen las áreas de fuga utilizadas para los análisis presentados en este trabajo, para las amenazas sísmica y de deterioro.

Tabla 4.7: Parámetros de daño utilizados en los análisis.

	Análisis en red real	Análisis en red experimental
Daño sísmico moderado [m^2]	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-5}
Daño sísmico mayor [m^2]	1.25×10^{-5}	1.25×10^{-4}
Daño deterioro [m^2]	1×10^{-5}	1×10^{-4}

Por otro lado, para considerar el efecto de los incendios en cada nodo se agrega una demanda de fuego en cada nodo en el tiempo indicado, multiplicando una demanda de control de fuego ($0.016 [m^3/s]$, caudal mínimo de grifo de incendio según NCh1646) por el número de incendios en el nodo. Se estima un área de fuga asociado a la demanda de fuego considerando que esta debe ser igual a la demanda de fuga, expresada por la ecuación (4.5), donde h_i es la carga hidráulica promedio durante la simulación en la red sin daño. Si se conociera la pérdida de agua actual en una red, esta misma metodología sería aplicable para realizar una estimación del parámetro de daño de deterioro.

$$A_i = \frac{d_i}{C_d \sqrt{2gh_i}} \quad (4.5)$$

Las fugas sólo pueden incluirse a través de la plataforma en los nodos de la red, sin embargo, el modelamiento de ciertas amenazas como la sísmica están enfocados en el daño que éstas generen sobre tuberías. Una metodología para incluir fugas en estos casos sería agregar un nuevo nodo en medio de cada tubería que represente el daño. En este trabajo se utilizan métricas cuyos valores se extraen de resultados entregados por el programa para los nodos de la red, por lo que, para poder comparar más fácilmente el estado sin daño de la red con los estados dañados, es útil mantener los mismos nodos en todos los análisis. Debido a esto, se opta por “traspasar” el daño de una tubería a sus dos nodos extremos. Para esto, se analiza el daño (área de fuga) acumulado en cada tubería y se le suma al daño de cada nodo correspondiente la mitad de este daño. En el caso de las tuberías que llevan a reservorios o a estanques, el daño completo de la tubería se agrega al daño del nodo que no lo es. Así, cada análisis mantiene el mismo número de nodos y el daño en la red se ve manifestado como fugas en los nodos originales.

5. Resultados de análisis de riesgo multi-amenaza

En este capítulo se presentan resultados de análisis realizados para ejemplificar la implementación de la metodología propuesta. Los valores utilizados para las propiedades de la red y de las amenazas se consideran razonables, pero no reemplazan lo que sería una correcta caracterización de los casos de estudio, que incluiría definir de manera correcta propiedades de los elementos del sistema, de su entorno y de las amenazas que les afectan.

5.1. Resultados sobre red operativa

Para el caso de estudio sobre la red operativa sólo se presenta un análisis de amenaza sísmica en conjunto con amenaza de deterioro, con el propósito de ilustrar la aplicación de la metodología sobre una red real. Los parámetros para la caracterización de amenaza serán los presentados en las Tabla 5.1 y Tabla 5.2:

Tabla 5.1: Parámetros análisis sísmico, red operativa.

GMPE	PGA a partir de Idini et, al. 2017
Profundidad hipocentral [km]	35
Tipo de evento	Interplaca
V_{s30} [m/s]	200
Periodo del suelo [s]	0.1
Peak definido en HSVR	Verdadero
Múltiples peaks en HSVR	Falso

Tabla 5.2: Parámetros de análisis de deterioro, red operativa.

Año con respecto al que se hace el análisis, t_0	10
Año inicial del rango de análisis	15
Año final del rango de análisis	40
Número de fallas por longitud hasta el año t_0, $N(t_0)$	0.2
Factor de aceleración, A	0.3

Se presenta a continuación la curva de amenaza sísmica muestreada (Figura 5.1) y la probabilidad de falla promedio debido a deterioro en las tuberías de la red (Figura 5.2).

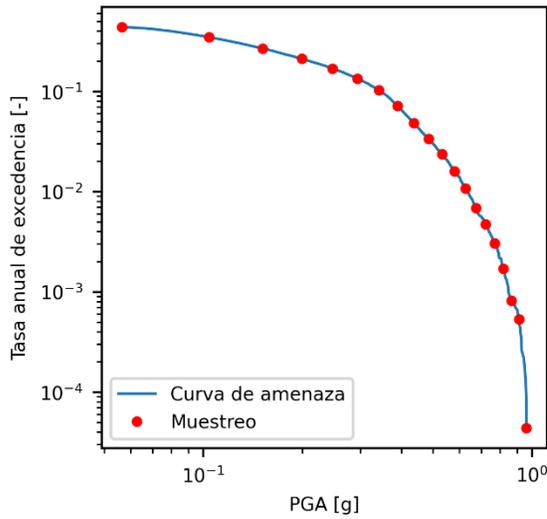


Figura 5.1: Curva de amenaza sísmica.

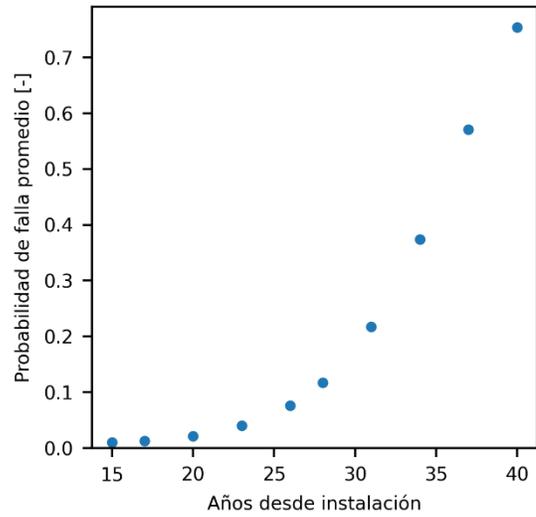
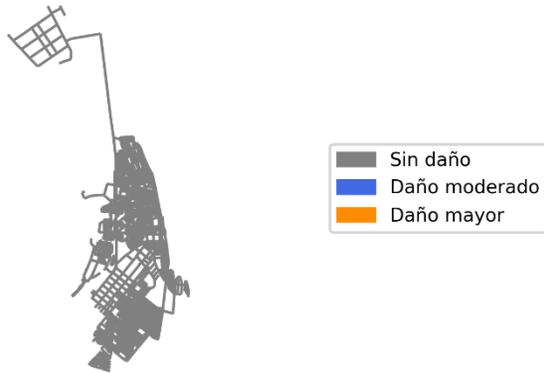


Figura 5.2: Probabilidad de falla promedio en la red.

Al evaluar la probabilidad obtenida de la curva de fragilidad a partir de las muestras de PGA de la curva de amenaza sísmica, se obtienen los mapas presentados en la Figura 5.3. En la leyenda presentada en la Figura 5.3 a) se ven los colores asociados a los distintos estados de daño. Se aprecia que para el escenario sísmico 10 presentado en la Figura 5.3 c) la red se ve afectada significativamente por la amenaza sísmica, presentando daño mayor en la mayoría de la red. Además, para el escenario sísmico 14 ya se aprecia este nivel de daño en prácticamente la red completa, presentado en la Figura 5.3 d) y de manera total en la Figura 5.3 e).

a) Red dañada, escenario sísmico n°1



b) Red dañada, escenario sísmico n°8



c) Red dañada, escenario sísmico n°10



d) Red dañada, escenario sísmico n°14



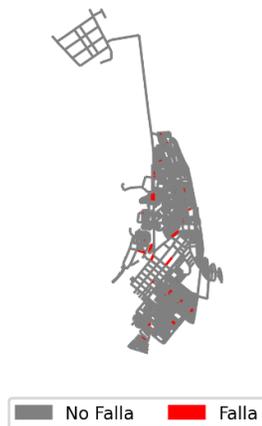
e) Red dañada, escenario sísmico n°20



Figura 5.3: Mapas de daño debido a amenaza sísmica.

En la Figura 5.4 se presentan los resultados de evaluar la probabilidad de falla por deterioro en las tuberías de la red. Se aprecia que a 5 años del tiempo inicial (a), la mayor parte de la red se ve sin problemas por deterioro. Ya a 18 años desde el tiempo inicial (b), existe un gran número de tuberías que presentan fallas, y a los 30 años (c) es prácticamente la red completa que presenta problemas por deterioro.

a) Tuberías que fallan por deterioro, año deterioro 15.0



b) Tuberías que fallan por deterioro, año deterioro 28.0



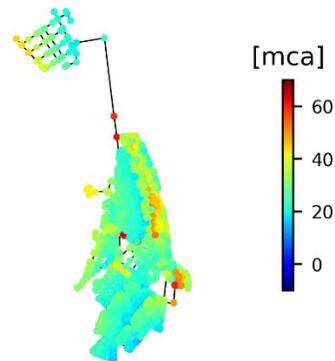
c) Tuberías que fallan por deterioro, año deterioro 40.0



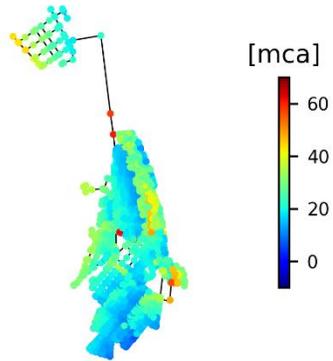
Figura 5.4: Mapas de daño debido a amenaza de deterioro.

Los efectos de estos mapas de daño se pueden apreciar en primera instancia en las figuras presentes en la Figura 5.5, donde se presentan mapas de presión promedio en el tiempo en los nodos de la red para distintos escenarios multi-amenaza. La combinación de las amenazas sísmica y deterioro produce un efecto notable en las presiones de la red, en especial hacia el sur de ésta. Existen zonas que no se ven particularmente afectadas y no pareciera haber una correlación con la elevación de éstas, por lo que se espera que exista un elemento nivelador de presión, como un reservorio o una bomba, cerca de estas zonas. Se nota que el análisis hidráulico entrega presiones negativas en 14 nodos para el caso más catastrófico, pero que estos parecieran no incidir en los resultados de demanda gracias a la implementación de PDA. Por esto, se plantea sólo considerar la presencia de estas presiones negativas como una indicación del gran efecto de las amenazas.

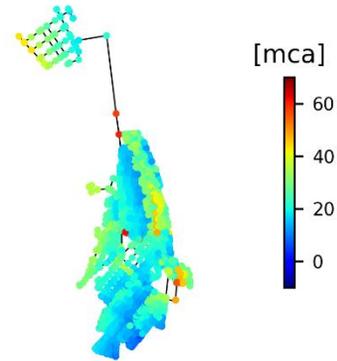
a) Presión promedio en los nodos red normal



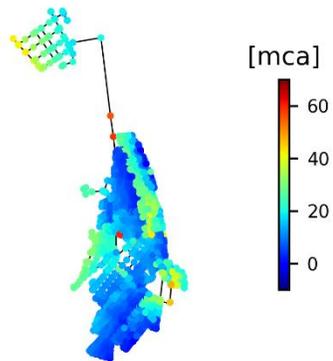
b) P_{mean} en red, escenario sísmico N°10 año 28



c) P_{mean} en red, escenario sísmico N°20 año 28



d) P_{mean} en red, escenario sísmico N°10 año 40



e) P_{mean} en red, escenario sísmico N°20 año 40

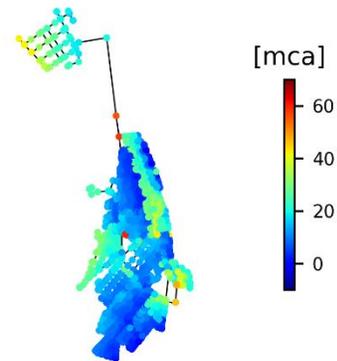


Figura 5.5: Mapas de presión promedio en los nodos para distintos escenarios multi-amenaza.

Debido a los cambios de presión promedio, en muchos nodos se produce un incumplimiento de la presión mínima normativa o P_{req} , lo que afecta en la métrica económica. Se aprecia de las figuras presentadas en la Figura 5.6 que no existe una gran diferencia en los efectos sobre la presión promedio entre el escenario sísmico 10 y el 20, pero sí existe un gran efecto sobre el incumplimiento de P_{req} debido al aumento de las fallas por deterioro. Algo que afectó esto es que el efecto sobre la presión del escenario sísmico dura sólo 24 horas, por lo que pondera menos en las 96 horas de simulación que la amenaza de deterioro que está activa durante toda la simulación.

a) Incumplimiento de P_{req} escenario sísmico N°10 año 28 **b)** Incumplimiento de P_{req} escenario sísmico N°20 año 28



c) Incumplimiento de P_{req} escenario sísmico N°10 año 40 **d)** Incumplimiento de P_{req} escenario sísmico N°20 año 40



Figura 5.6: Mapas de incumplimiento de P_{req} .

Los mapas presentados anteriormente reflejan cambios promedios en los nodos individuales de la red debido a las amenazas sísmicas. Sin embargo, a través de las métricas hidráulicas de la red utilizadas en este trabajo, también es posible tener una visión de cómo se ve afectada la red completa en promedio a través del tiempo. En las figuras presentadas en la Figura 5.7 se puede apreciar que el efecto de la implementación de la amenaza entre las 24 y 48 horas como una disminución general en la demanda de la red con respecto a la demanda esperada, mientras que la amenaza de deterioro actúa entre las 0 y 96 horas. Es notable que la diferencia entre el escenario sísmico 10 y 20 es mínima, al igual que en los mapas asociados a presión promedio por nodo. Por otro lado, la diferencia entre el efecto de deterioro al año 28 con respecto al año 40 es significativa, siendo el del año 28 prácticamente nulo en comparación a los efectos sísmicos.

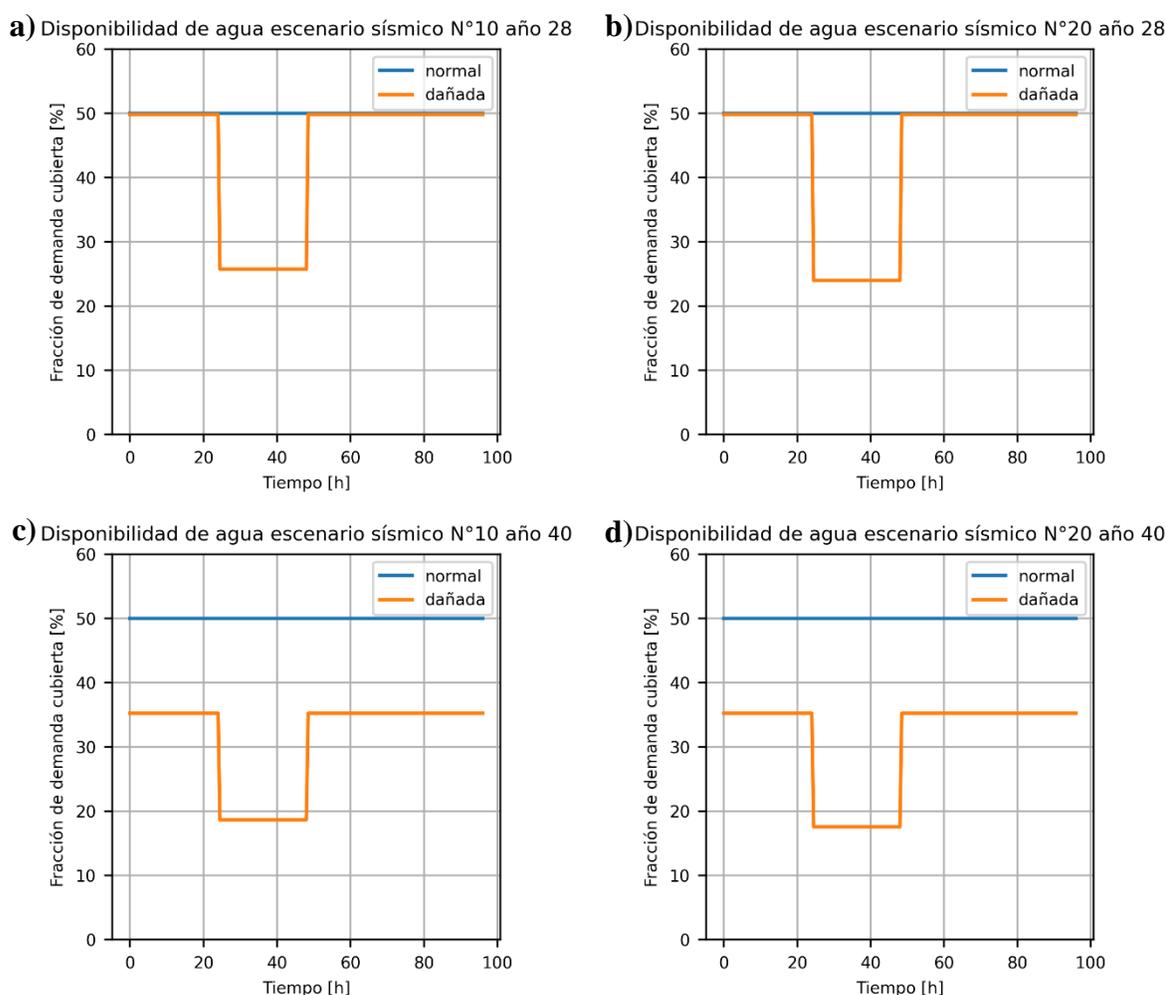


Figura 5.7: Patrón de WSA en el tiempo.

Algo importante que comentar con respecto a la Figura 5.7 es que la red en su estado normal mantiene un WSA de 50% constante durante la simulación. Las razones por las que las demandas obtenidas con WNTR a través del análisis hidráulico son menores a las esperadas probablemente está relacionado con la ausencia de algún elemento o alguna condición de borde en el modelo de la red que se utilizó. Al analizar la demanda calculada para los nodos de la red en su estado normal, ilustrados en la Figura 5.9, se puede notar que uno de los nodos posee una demanda negativa de varios órdenes de magnitud que cualquier otra demanda positiva del sistema. Una posible explicación para esto es que el modelo fuese creado originalmente considerando una entrada de caudal al sistema por una fuente externa que no se incluyó como elemento en la red, por lo que esa entrada de caudal se incluyó como una demanda negativa en un nodo. Ese nodo obtendría una WSA negativa de gran magnitud dado que las demandas esperadas en los nodos, presentadas en la Figura 5.8, son todas positivas y de órdenes de magnitud menores, lo que lleva a un WSA promedio de la red menor a 100%.

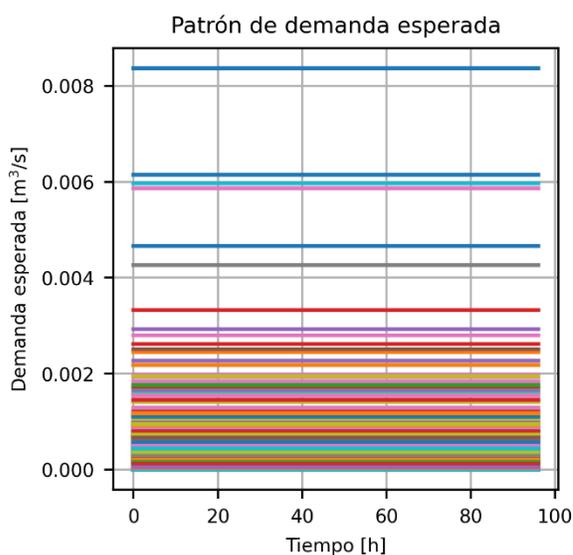


Figura 5.8: Patrones de demanda esperada de la red operativa.

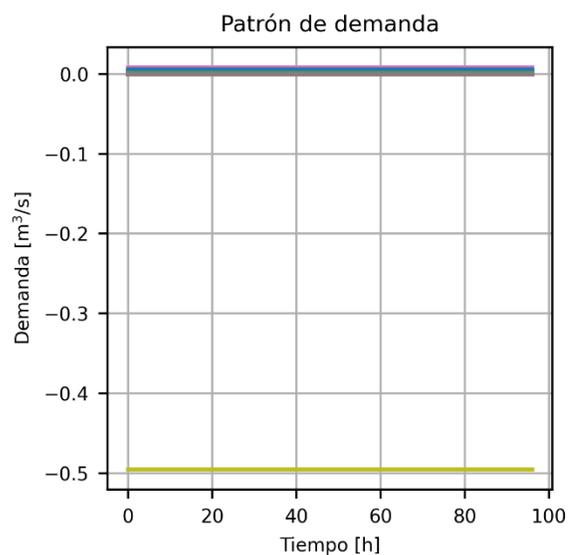


Figura 5.9: Patrones de demanda obtenidos de WNTR de la red operativa.

Para condensar los resultados de las simulaciones de redes afectadas por escenarios multi-amenaza, se obtienen sus métricas hidráulicas y se calcula la diferencia entre estas y las métricas de la red en estado normal. Estas métricas representan el estado de la red para cada hora de simulación, por lo que se toman dos valores representativos para cada una, la máxima variación y el promedio en el tiempo de cada métrica. Luego, se asocian estos valores a las tasas de excedencia de cada escenario sísmico para generar curvas de riesgo, donde cada curva corresponde a un escenario de amenaza de deterioro. También se juntan los valores de año de cada escenario de deterioro con la máxima diferencia y promedio de cada métrica, generando curvas asociadas a cada escenario sísmico.

En la Figura 5.10 se presentan las curvas de riesgo de máxima variación de métricas. Se aprecia que en todos los casos se produce una saturación del efecto sísmico, un evento de tasa de excedencia anual de 10^{-2} produce el mismo efecto sobre la red que uno de 10^{-4} , y este efecto es independiente de los escenarios de deterioro. Esto está asociado a que después de un cierto valor de PGA la probabilidad de que las tuberías fallen es muy cercana o igual a 1, lo que se puede apreciar en el mapa de la Figura 5.3 d) donde la mayoría de la red se encuentra con un estado de daño mayor. Este efecto de “saturación” de daño en la red debido a amenaza sísmica comienza cerca del escenario 12 y ocurre para todas las métricas.

Por otro lado, dado que la probabilidad de falla por deterioro aumenta exponencialmente, se podría esperar que las curvas fuesen alejándose entre ellas a medida que aumentan los años de los escenarios de deterioro. Sin embargo, no ocurre esto, por lo que también debe existir una saturación de la amenaza de deterioro.

Además, se puede apreciar que el efecto de la amenaza de deterioro es mayor para escenarios sísmicos de PGA más bajo, dado que el rango entre máxima diferencia de métricas es mayor para tasas de excedencia mayores, mientras que las curvas tienden a “apretarse” hacia tasas de excedencia menores. Este efecto de “embotellamiento” se mantiene constante luego de la saturación de daño sísmico, por lo que se evidencia que esta diferencia de rangos está estrictamente ligada a un efecto multi-amenaza, donde el daño conjunto de las amenazas sobre la red presenta un comportamiento que no es simplemente la suma de los efectos de las amenazas por separado, incluso considerando que el daño implementado en este trabajo fue simplemente acumulativo. Sin embargo, este efecto no se aprecia en la Figura 5.11 que muestra el promedio de variaciones de métricas, por lo que es algo que ocurre sólo con la máxima variación.

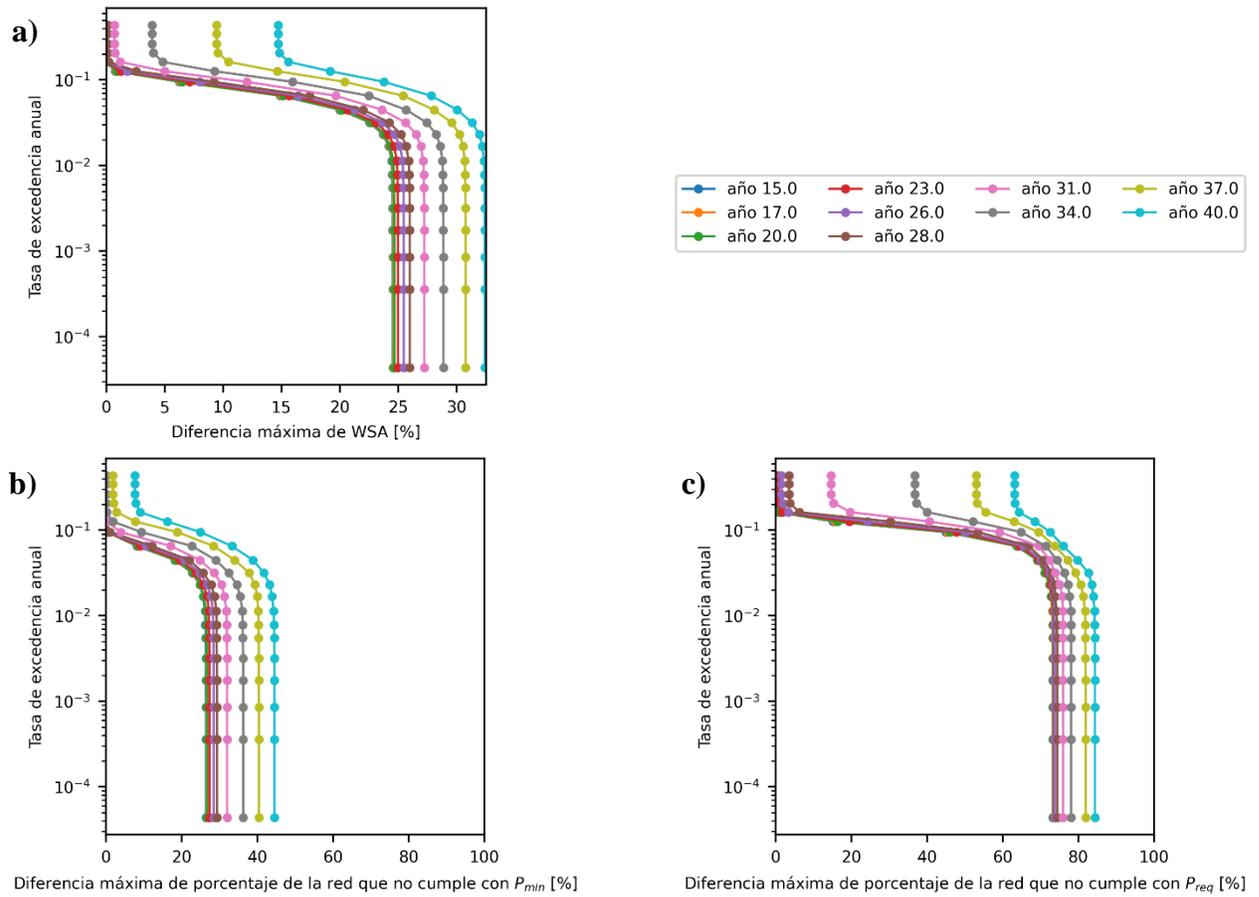


Figura 5.10: Curvas de riesgo de máxima variación de métricas.

En la Figura 5.11 se presentan las curvas de riesgo de promedio de variación de métricas. Estas curvas están estrictamente ligadas a la temporalidad de las amenazas, por lo que se espera que varíen dependiendo de la proporción entre el tiempo de acción de las distintas amenazas y el tiempo de simulación hidráulico. En particular, dado que el efecto sísmico actúa sólo por 24 de las 96 de la simulación, se espera que su impacto en el promedio de las diferencias de métricas se vea reducido en comparación a la máxima variación de métricas.

Se observa que no pareciera existir la tendencia de las curvas a apretarse hacia tasas de excedencia anual menores, o por lo menos debe ser una tendencia tan reducida que no se puede apreciar a simple vista. Esto se puede explicar por la relación temporal entre la amenaza sísmica y el tiempo de simulación y se propone que la tendencia a apretarse de las curvas volvería a aparecer si se redujera el tiempo de análisis o se aumentara el tiempo del efecto sísmico. Además de esto, se considera que los comportamientos de las curvas son similares a los de la Figura 5.10.

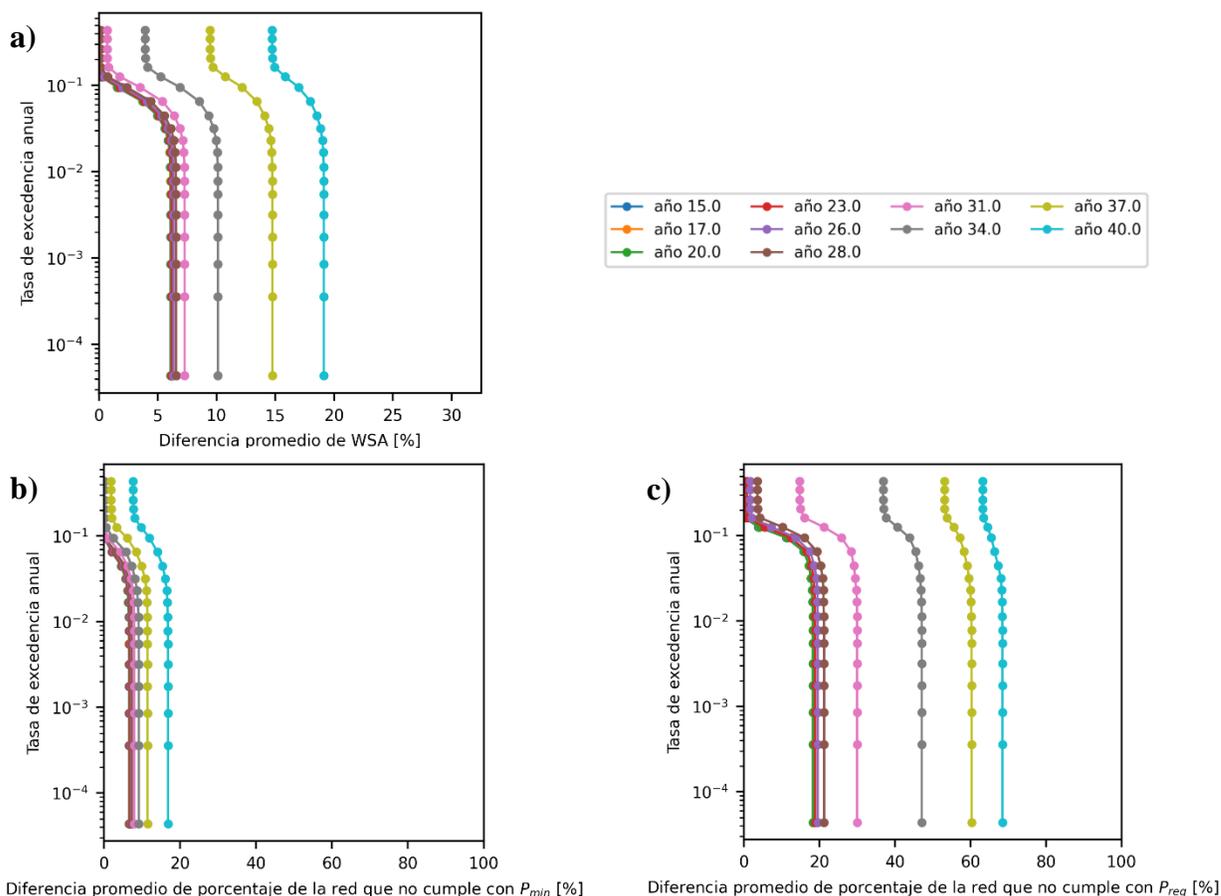


Figura 5.11: Curvas de riesgo de promedio de variaciones de métricas.

Las curvas presentadas en la Figura 5.12 representan la variación del efecto de un escenario sísmico con los años de instalación sobre la máxima variación de métricas. Se aprecia que las curvas muestran un crecimiento hasta los 40 años, pero que pareciera tener una primera etapa de aceleración y luego una segunda donde todavía existe crecimiento, pero donde el efecto va desacelerando. Se espera que si se realizara el análisis considerando más años se podría llegar a un punto de saturación del efecto de deterioro, asociado al estado en el que la probabilidad de falla sea 1 en todas las tuberías de la red.

La saturación del efecto de los escenarios sísmicos también es evidente en estas figuras, donde se acumula la mayoría de las curvas en la parte superior de cada gráfico. También se aprecia un efecto de embotellamiento hacia los años mayores, por lo que nuevamente se evidencia una cualidad de la implementación multi-amenaza de este trabajo, donde el efecto sobre la red aparenta no ser solamente la suma de los efectos individuales de las amenazas.

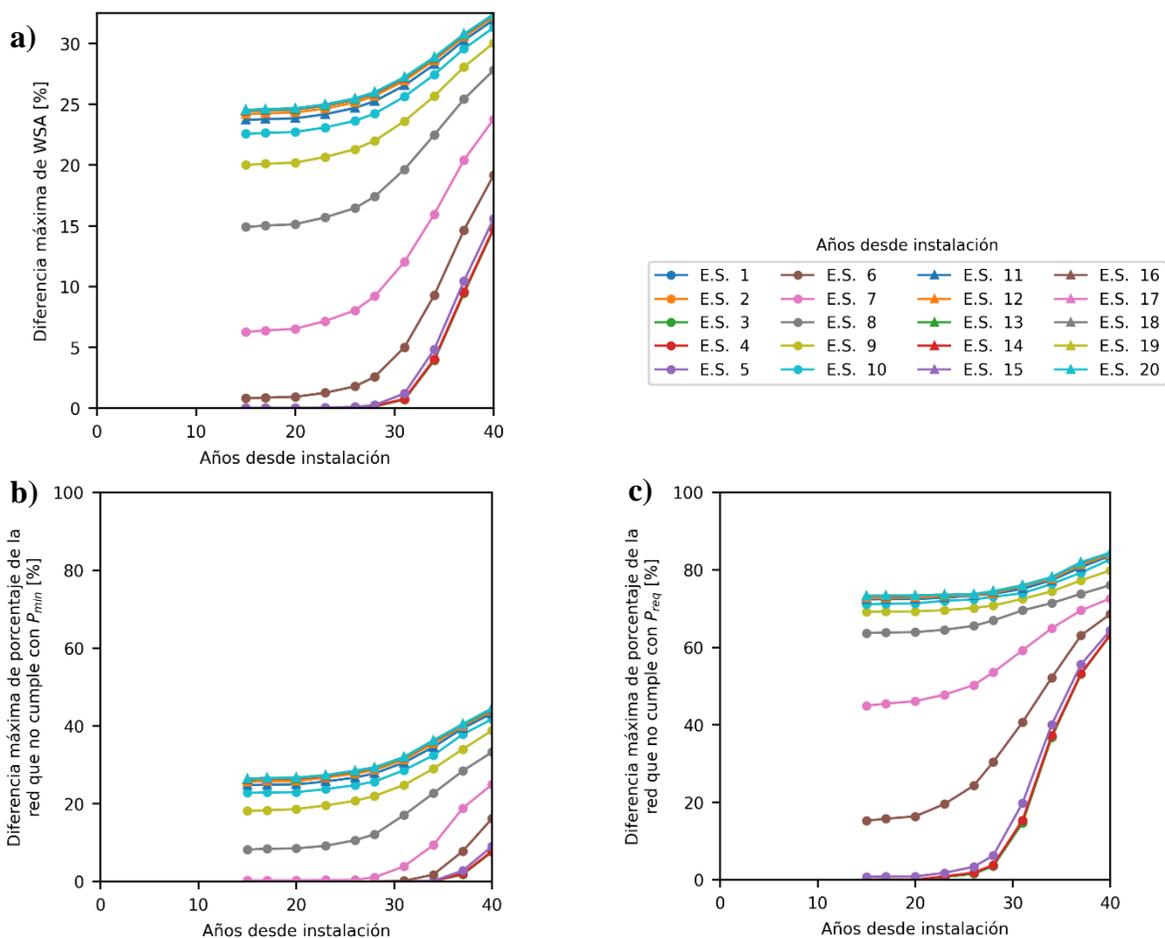


Figura 5.12: Curvas de máxima variación de métricas según años de instalación.

Las curvas de la Figura 5.13 son curvas de promedio de variaciones de métricas según los años de instalación, y se evidencia un comportamiento similar a de las curvas de la Figura 5.12, por lo que se esperaría que al aumentar los años de análisis también eventualmente llegue a un punto de saturación, pese a que pareciera que la Figura 5.13 a) y la Figura 5.13 b) todavía no evidencian su desaceleración a los 40 años. Algo muy importante es que el efecto de embotellamiento hacia años mayores es mucho más pronunciado que para las curvas de máxima variación de métricas, debido a que el efecto de deterioro pondera más dentro del promedio que el efecto sísmico. Es razonable considerar que el efecto mostrado en estas figuras es el efecto complementario al evidenciado en la Figura 5.11, donde el embotellamiento no es evidente a simple vista.

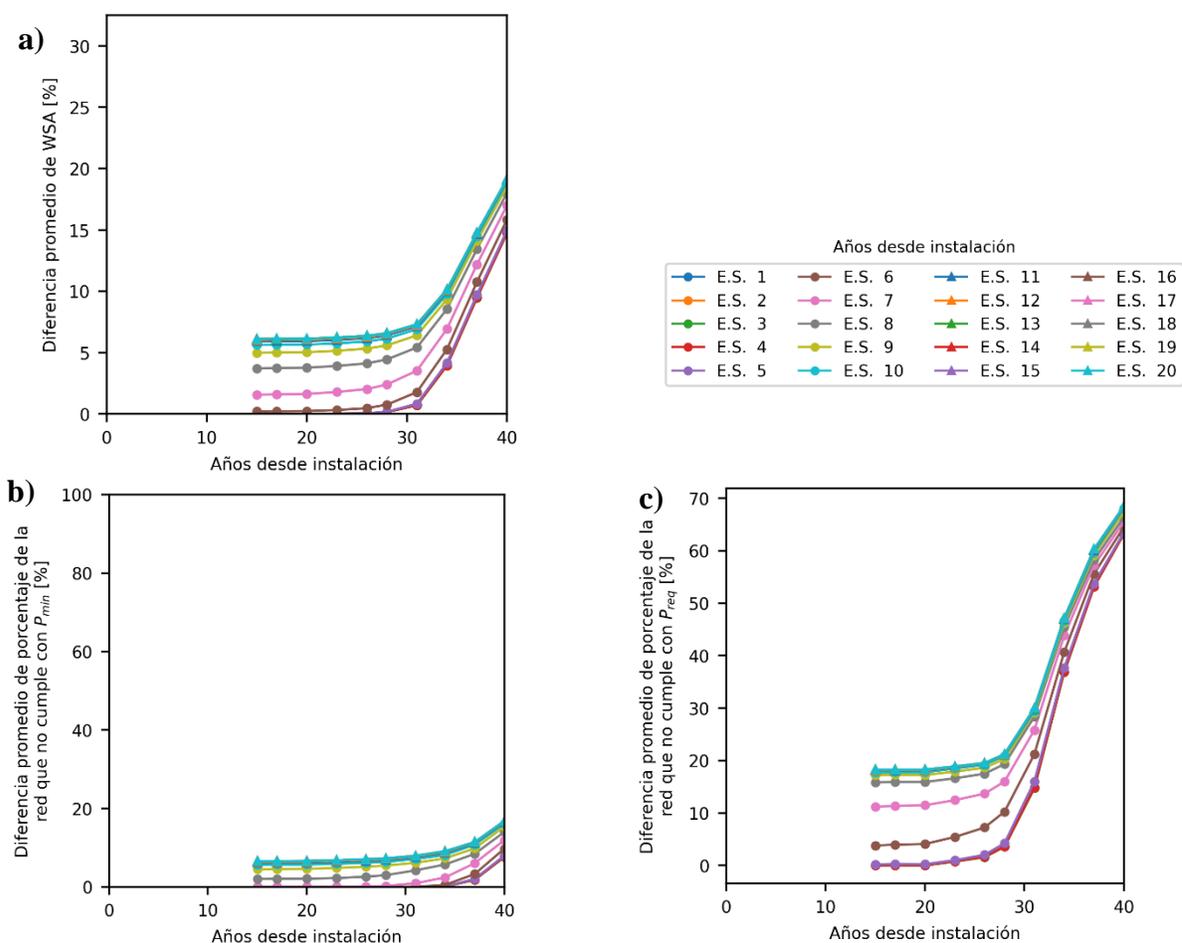


Figura 5.13: Curvas de promedio de variaciones de métricas según años de instalación.

Finalmente, se presentan las curvas asociadas a la métrica económica en la Figura 5.14, donde se evidencia la rápida saturación de la métrica en su límite normativo de 1000 UTM. Esto indicaría que de ser confiable la implementación de esta métrica, la red sería muy sensible a amenazas en el estado propuesto, por lo que sería económicamente rentable considerar la preparación de estrategias de mitigación cuyo costo sea menor a los cerca de 56 millones de pesos chilenos que corresponderían a la multa al momento de escritura. Es posible que, dado el monto en comparación a los costos de cualquier tipo de reparación de la red, una métrica económica asociada a los costos de reparación post-evento sísmico fuese más apropiada para incentivar el uso de estrategias de mitigación.

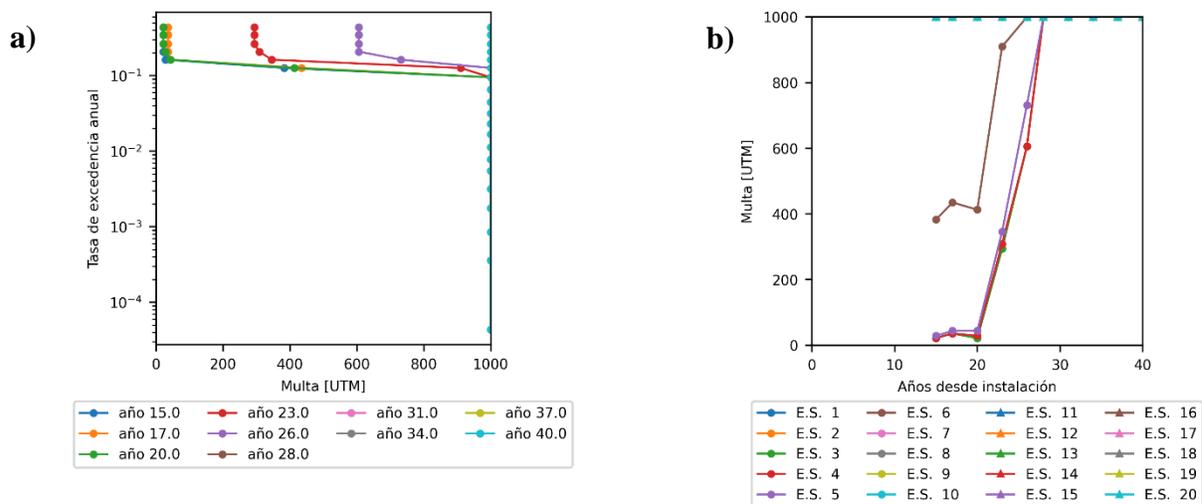


Figura 5.14: Curvas de métricas económicas.

En resumen, las métricas presentadas reflejan que el comportamiento de la red se ve afectado negativamente por la influencia de los escenarios multi-amenaza, y este efecto aumenta para escenarios extremos. Se pueden sacar muchas conclusiones distintas a partir de las figuras presentadas. De las curvas de riesgo se puede concluir que la red en la configuración analizada se empezaría a ver afectada por eventos sísmicos cuya tasa anual de excedencia es de 0.1, es decir, se espera que ocurran eventos que afecten negativamente a la red cada 10 años, y que los eventos que llegarían a saturar el daño sísmico tienen una tasa de excedencia anual de 0.03, por lo que se esperaría que la red se vea afectada por escenarios catastróficos cada 33 años. Por otro lado, el efecto de deterioro se aprecia notablemente desde alrededor de los 25 años de instalación, por lo que sería prudente considerar recambios de las tuberías de la red antes de llegar a tal periodo. La ocurrencia de escenarios sísmicos extremos llevaría a efectos muy distintos en la red dependiendo de los años de instalación de las tuberías. Por ejemplo, el porcentaje de la red que en promedio no cumpliría con la presión mínima normativa en 96 horas alrededor de un evento sísmico extremo pasaría de cerca de un 20% con una antigüedad de tuberías de 25 años a un 70% para tuberías con 40 años de antigüedad. Por otro lado, esta misma métrica se ve cada vez menos afectada por los escenarios sísmicos con la antigüedad de la red, siendo el aumento de porcentaje que en promedio no cumple con la presión requerida es de cerca de 0% para los escenarios menores a los 15 años de instalación hasta 20% para los escenarios extremos, mientras que a los 40 años el aumento es de 65% a 70%.

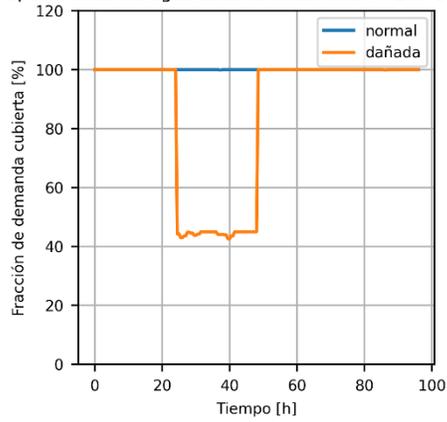
5.2. Resultados de análisis sobre redes experimentales

Con el propósito de ilustrar la implementación de la amenaza de FFE, se presentan a continuación resultados de análisis sobre una red experimental. Como se explicó previamente, la implementación de amenaza de FFE implica que se considere una amenaza para cada nodo de la red en la obtención de temporalidad, lo que aumenta significativamente el número de periodos de tiempo de análisis. Cada periodo de tiempo significa una pausa y continuación de la simulación hidráulica, que afecta en el tiempo computacional requerido para terminar el análisis hidráulico de un escenario multi-amenaza. Esto permite aseverar que la implementación es capaz de considerar más amenazas que las implementadas en este trabajo, con el costo de necesitar mucho tiempo computacional para hacer cualquier análisis que incluya FFE. La red experimental presentada tiene un número de elementos significativamente menor que la red operacional, por lo que los resultados a continuación no fueron obtenidos a partir de esta última. Ya que se busca que estos resultados complementen a los ya presentados, los parámetros utilizados para la caracterización de amenaza, las figuras obtenidas de tal etapa y los mapas obtenidos de los resultados finales se encuentran en el capítulo de Anexo.

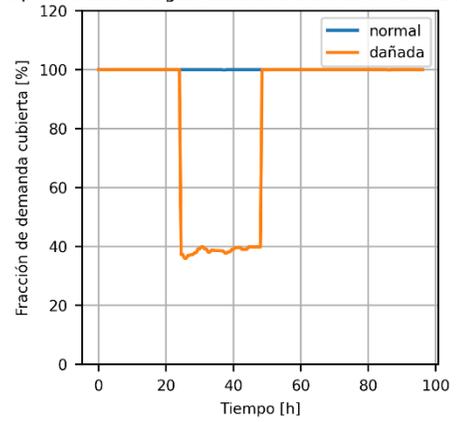
En los patrones presentados en la Figura 5.15 se evidencian los efectos de la temporalidad de las distintas amenazas. Dado que los tiempos de inicio de los incendios son aleatorios, su efecto se observa como una irregularidad en el comportamiento de la WSA de la red en el tiempo. Los tiempos de inicio de incendio son los mismos para un mismo escenario sísmico, por lo que las diferencias que se pueden apreciar entre el efecto de FFE en la Figura 5.15 a) con respecto a la Figura 5.15 c) y en la Figura 5.15 b) con respecto a la Figura 5.15 d) están asociadas a un efecto multi-amenaza de la implementación. En particular, se observa que no es posible apreciar un efecto de FFE luego de las 48 horas en la Figura 5.15 a) y la Figura 5.15 b), pero sí existe un efecto claro en la Figura 5.15 c) y Figura 5.15 d), por lo que el daño debido a deterioro está influenciando su efecto. Por otro lado, el efecto entre 24 y 48 horas se ve menos acentuado, durante la duración del efecto sísmico.

Existe también un efecto multi-amenaza de la implementación en la máxima disminución de WSA, dado que a partir de la figura b) se puede deducir que el máximo efecto conjunto de amenaza sísmica con FFE es una disminución de alrededor de un 60%, mientras que del principio de las figuras c) y d) se espera que el efecto máximo de deterioro sea de un 40%. Sin embargo, el máximo efecto sobre la red que se puede ver en la figura d) es de una disminución de un 80%, que es menos que la suma de los máximos efectos de todas las amenazas. Esto implica que bajo la implementación realizada el efecto sobre la métrica hidráulica bajo multi-amenaza es menor que la suma de los efectos por separado.

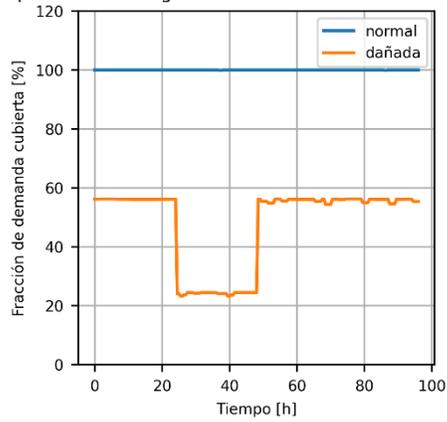
a) Disponibilidad de agua escenario sísmico+FFE N°10 año 28



b) Disponibilidad de agua escenario sísmico+FFE N°20 año 28



c) Disponibilidad de agua escenario sísmico+FFE N°10 año 40



d) Disponibilidad de agua escenario sísmico+FFE N°20 año 40

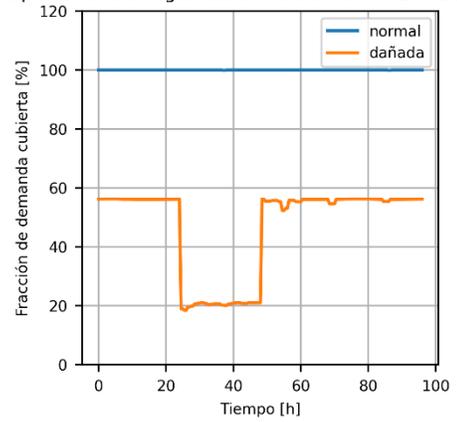


Figura 5.15: Patrón de WSA en el tiempo.

Las curvas de la Figura 5.16 presentan “irregularidades” debido a la aleatoriedad del tiempo de inicio de incendio. La disminución en las métricas debido a FFE va a estar dada por la combinación de cuántos incendios se producen junto a cuándo se producen, por lo que si en un escenario con pocos incendios todos ocurren a un mismo tiempo, se espera que se produzca una mayor disminución que en un escenario con muchos incendios con más dispersión temporal. Esto afecta particularmente a las curvas de máxima variación de métricas, dado que, por ejemplo, se presentan mayores disminuciones para el escenario sísmico 3 que para el 4. Nuevamente se aprecian los efectos de saturación de daño y de embotellamiento hacia escenarios más extremos, por lo que se evidencia que no era una característica solamente del análisis sobre la red operacional.

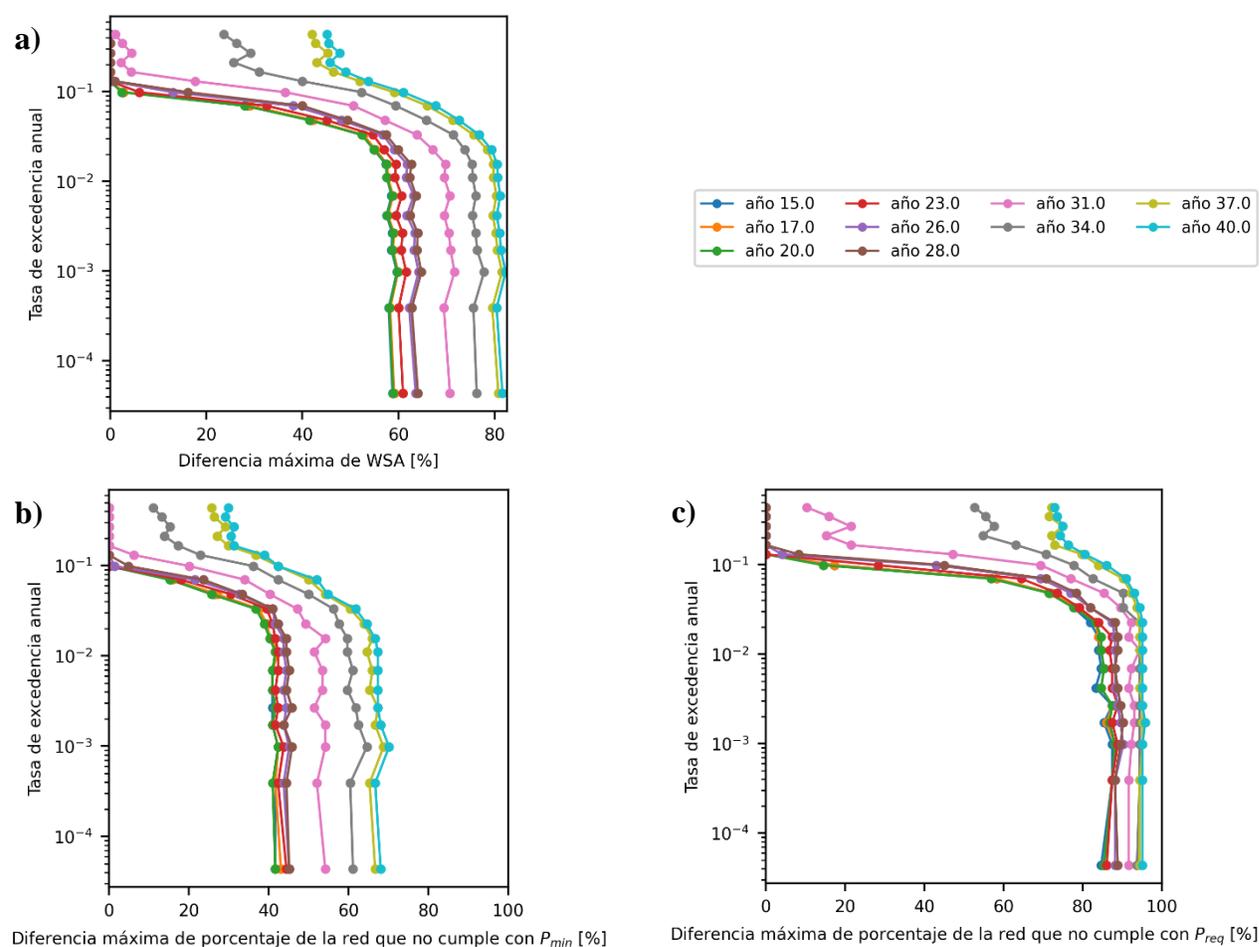


Figura 5.16: Curvas de riesgo de máxima variación de métricas.

Por otro lado, las irregularidades se ven mucho menos acentuadas en las curvas de la Figura 5.17, donde su comportamiento es similar al presentado para los resultados de la red operativa. Nuevamente se presenta una saturación del daño por deterioro en la red y la separación entre las curvas es irregular, habiendo una gran diferencia desde la curva del año 31 a la del 34, pero una disminución de esta diferencia de la curva del año 34 a la del 37, evidenciando una saturación de daño. El efecto de la amenaza de deterioro sólo pareciera manifestarse a partir del año 31 en la red analizada, según lo presentado en la Figura 5.17.

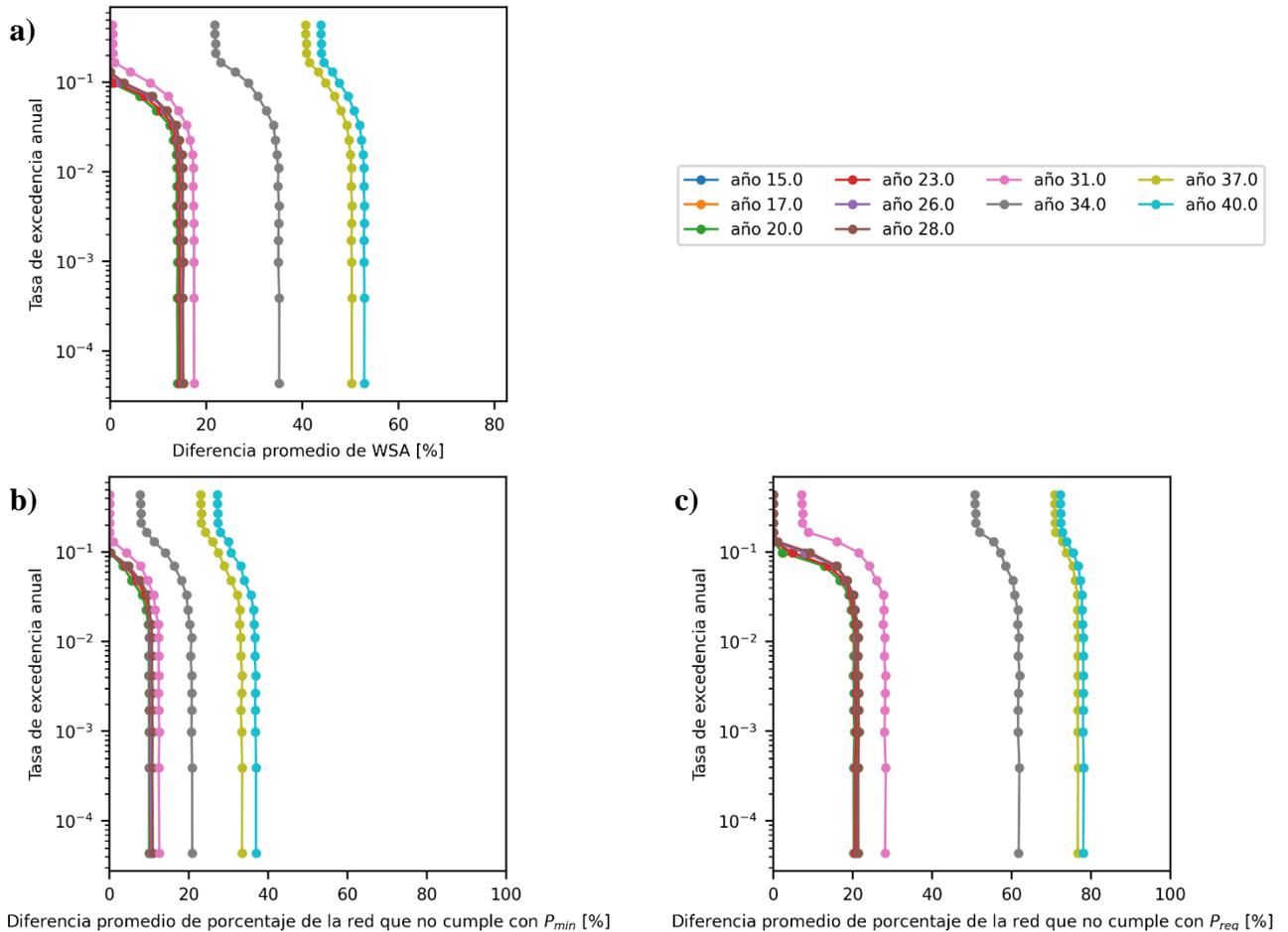


Figura 5.17: Curvas de riesgo de promedio de variaciones de métricas.

Las curvas de la Figura 5.18 muestran nuevamente el efecto de la temporalidad de la amenaza FFE, sólo que en este caso se manifiesta en que la forma de las curvas sea distinta entre curva y curva, si bien manteniendo una cierta tendencia. Se aprecia un gran embotellamiento hacia los mayores años. En la Figura 5.19 se aprecian curvas con forma mucho más regular, donde además se nota un fuerte efecto de embotellamiento hacia los mayores años. La aceleración que existe desde un cierto año en las curvas de la Figura 5.18 pareciera ser especialmente grande para el máximo porcentaje de la red que no cumple con la presión requerida, lo que se aprecia también en la Figura 5.17 c) con la separación entre las curvas de riesgo.

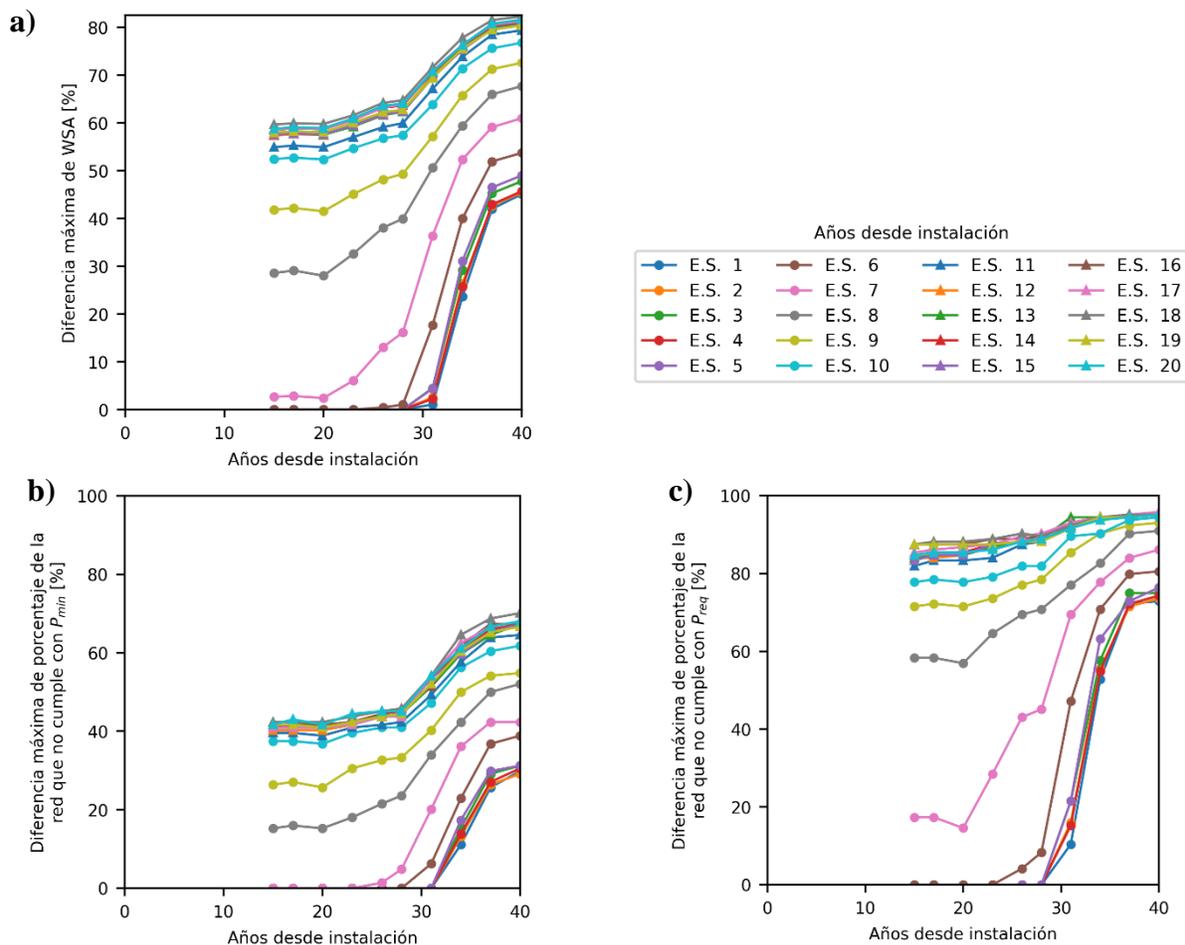


Figura 5.18: Curvas de máxima variación de métricas según años de instalación.

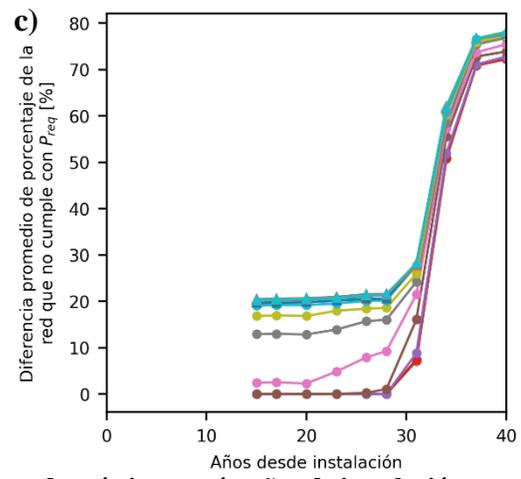
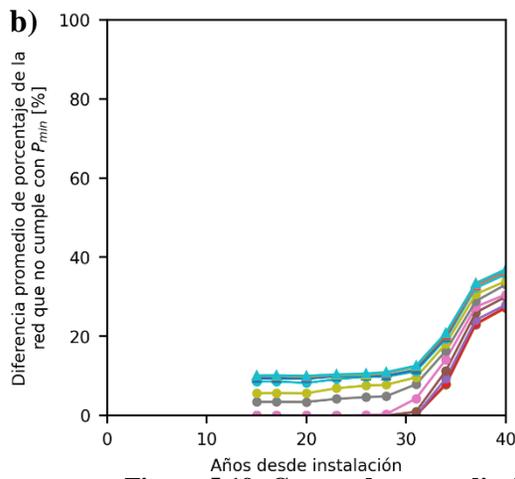
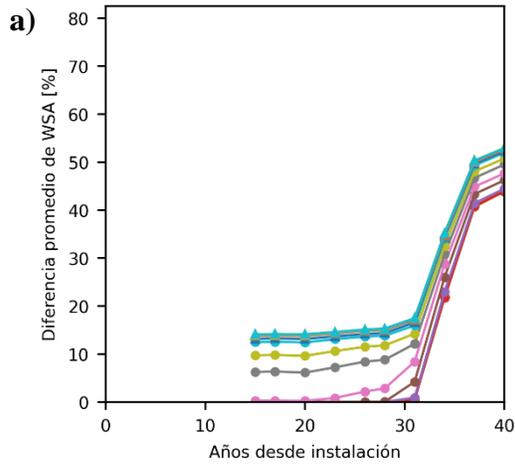


Figura 5.19: Curvas de promedio de variaciones de métricas según años de instalación.

Las curvas de la Figura 5.20 indican que la métrica económica implementada pasó rápidamente de ser nula para todos los escenarios sísmicos sin la presencia de deterioro a saturarse completamente para los escenarios de deterioro extremos. Esto se relaciona con la tendencia general de las figuras anteriores donde el crecimiento del daño debido a deterioro presenta una aceleración muy rápida desde un cierto año, lo que también se evidencia en la Figura 5.20 b).

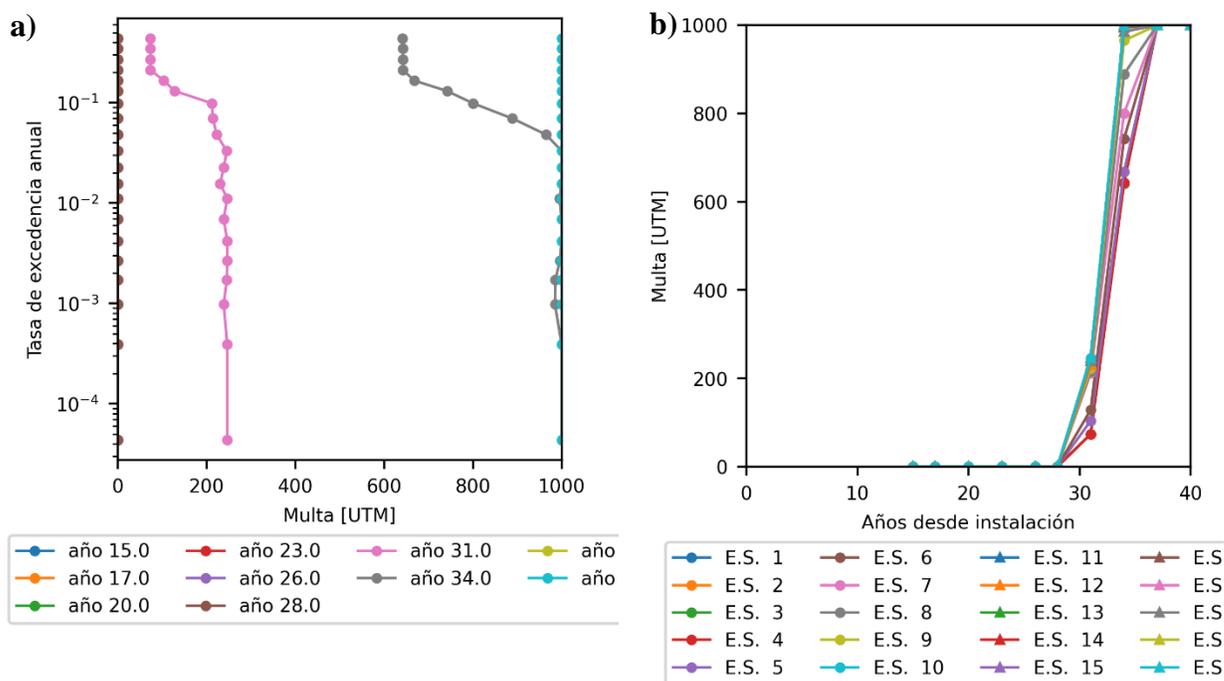


Figura 5.20: Curvas de métricas económicas.

Los resultados del análisis sobre la red experimental considerando todas las amenazas implementadas permite ilustrar el efecto de la temporalidad sobre las métricas, en particular sobre las máximas variaciones, donde se aprecia la irregularidad de las curvas debido a que el tiempo de inicio de los incendios es distinto para cada escenario sísmico. Se ilustra el efecto de las distintas amenazas implementadas en la red con las curvas de WSA en el tiempo de la Figura 5.15, donde además se nota que el efecto de las amenazas en conjunto sobre la métrica es menor que la suma de los efectos individuales, en la implementación realizada. Se aprecia esto en el embotellamiento hacia escenarios extremos apreciado en las curvas de la Figura 5.17, en la cual también se aprecia el efecto de la saturación de daño apreciada en los resultados del análisis sobre la red operacional. En la Figura 5.19 se observa la aceleración y posterior desaceleración del crecimiento del efecto sobre la red con los años, además del embotellamiento hacia años mayores. Finalmente, las curvas asociadas a la métrica económica indican que los escenarios escogidos no permiten caracterizar el avance de la métrica para esta red en particular, presentando valor nulo o saturado en la mayoría de los análisis.

6. Discusión y conclusiones

La metodología presentada está enfocada directamente en la evaluación de una red sujeta a eventos de amenaza que ocurren dentro de un mismo margen de tiempo, de manera que se pueda obtener métricas del efecto sobre la red considerando un alto número de eventos. Esto permite cuantificar la severidad de eventos de distinta probabilidad de ocurrencia, lo que es información útil al momento de tomar decisiones con respecto a medidas de prevención o planes de mitigación, dado que se puede tomar una decisión de qué nivel de efecto es aceptable en base a su tasa o probabilidad de ocurrencia.

Expandiendo sobre esto último, en el trabajo se evalúan muchos niveles de severidad que son posibles, aunque sean poco probables. Los eventos sísmicos de muy baja tasa de ocurrencia requerirían de un período de tiempo de simulación tan alto para que se manifiesten en el tipo de evaluación descrita, que en muchos casos se podría escoger ignorarse. Esto lleva a una ventaja y desventaja clara de la metodología utilizada en esta tesis, por un lado, se puede analizar fácilmente eventos catastróficos y por lo tanto planificar contra ellos, pero por otro los valores obtenidos de estos eventos poco probables pueden eclipsar a los de los eventos más probables. Esto último podría ser un problema durante la toma de decisiones, debido a que se podría pensar que los efectos de un evento intermedio no son tan importantes en comparación con los eventos catastróficos, sin embargo, el evento intermedio puede ser suficiente en muchos casos para generar problemas sobre la capacidad de la infraestructura de cumplir su deber ante la población.

El trabajo presentado puede ser expandido de muchas formas. Dado que en la realidad los recursos son finitos, ante un evento catastrófico que dañe numerosos elementos de la red, tener un mapa de prioridades de ésta, sería indispensable para llevar a un manejo de desastres responsable y seguro. Esta u otras herramientas de respuesta ante amenazas que podrían generarse a partir de solamente los análisis presentados en este trabajo se verían muy beneficiados por un análisis así. Bajo esa misma línea, se podría haber propuesto formas de traducir los resultados de los análisis presentados en herramientas de prevención, mitigación, o de respuesta ante amenazas, que son parte fundamental de los resultados de un análisis de riesgo.

El daño se incorporó en el análisis como áreas de fugas asociadas al efecto de cada amenaza que se integran en los nodos. Esta implementación se podría mejorar de distintas maneras, como incluir incertidumbre en el cálculo de área de fuga a través de valores asociados a alguna distribución de probabilidad. Se podría encontrar mejores relaciones entre amenazas para caracterizar el daño que no sea sólo sumar las áreas de fuga. En la implementación se buscó comparar los mismos nodos por la forma en la que se determinan las métricas, pero esto si se cambiara la forma en la que se calculan las métricas, también se podría cambiar la implementación para agregar nodos en medio de las tuberías que representen los puntos de fuga. Las áreas asociadas a los efectos de las amenazas

que se utilizaron en el trabajo fueron arbitrarias para producir resultados ilustrativos, por lo que es necesario realizar una mejor caracterización de éstas. Una forma que podría entregar resultados más apropiados podría estar relacionada con determinar demandas de fuga representativas de ciertos estados de daño a un cierto nivel de carga hidráulica o presión y determinar un área de fuga asociado a esta demanda a través de la misma forma utilizada para calcular el área en el caso de FFE. También se podría incluir daño en otros elementos de la red, como estanques y bombas.

Se debiese incorporar en el análisis la influencia del tiempo de reparación. En la implementación, el efecto de cada amenaza se mantiene constante hasta un tiempo fijo, pero sería interesante estudiar cómo se comportaría la red si se considerara una reparación de esta que vaya disminuyendo el daño en el tiempo. Además, en la realidad no siempre se llega al mismo nivel de desempeño que se tenía antes de un evento que afecte a la red, por lo que también se debiese incorporar la posibilidad de que la reparación no sea completa.

La métrica económica utilizada es sólo ilustrativa, por lo que se debiese utilizar alguna relación que permita entregar mejor información para la correcta estimación de daño económico debido a los efectos de las amenazas. Por ejemplo, se podría incluir una métrica que esté asociada a los costos de reparación del daño causado por los distintos escenarios, lo que permitiría a una empresa determinar cuánto presupuesto destinar a estrategias de mitigación. También se podrían caracterizar las pérdidas en las que podrían incurrir las empresas si se tiene una interrupción del servicio que impida generar ingresos a través de cobros a clientes.

Además, la implementación se debe extender a más amenazas y se deben refinar las que ya están incluidas. La implementación sísmica se podría mejorar teniendo mejor caracterizados los parámetros de las GMPE y se podría automatizar el procesamiento de catálogo sísmico dependiendo de la zona. El análisis de deterioro se podría realizar con modelos más sofisticados, que tal vez incluyan más estados de daño y la amenaza de FFE requiere una correcta caracterización del número de clientes por nodo.

Otra forma de haber enfrentado el problema multi-amenaza habría sido realizar un modelamiento de la red en períodos más largos de tiempo. Si bien la metodología presentada está enfocada en eventos de ocurrencia simultánea, la implementación de temporalidad de los efectos de los escenarios de amenaza permitiría evaluar una red durante el período de tiempo que se quisiera, lo que implica que con suficiente tiempo computacional y con modelos probabilísticos de ocurrencia se podría simular cómo una red se comportaría durante, por ejemplo, un cierto número de años de estudio. En vez de evaluar todos los eventos posibles de amenaza, en cada paso de tiempo se podría determinar si un cierto evento ocurre o no en base a su probabilidad de ocurrencia. Esto llevaría a niveles de información distintas, ya que permitiría la evaluación de la capacidad de la red de sobrevivir en condiciones más probables.

7. Bibliografía

- Alliance American Lifelines (ALA). (2001). Seismic Fragility Formulations For Water Systems. In ASCE. https://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Part_1_Guideline.pdf
- Baker, J. W. (2013). An introduction to probabilistic seismic hazard analysis. White Paper Version, 2(1), 79.
- Bastías, N., Montalva, G. A., & Leyton, F. (2018). Modelo Predictivo de Velocidad Máxima (PGV) y Espectral (PSv) para Zona de Modelo Predictivo de Velocidad Máxima (PGV) y Espectral (PSv) para Zona de Subducción Chilena Resumen. December.
- Ezell, B. C. (2007). Infrastructure vulnerability assessment model (I-VAM). *Risk Analysis*, 27(3), 571–583. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2007.00907.x>
- Fernández Fuenzalida, G. A. A. (2021). Diseño de una metodología general para la identificación de elementos críticos en redes de distribución de agua potable. Universidad de Chile.
- Flores, R., Pérez, J., & Uribe, F. (2018). Valoración de la tierra de uso residencial y su contribución al valor de mercado de la vivienda en Chile. *Estudios Económicos Estadísticos* N°126, Banco Central de Chile.
- Garvs, I. (2020). DESARROLLO DE CURVAS DE FRAGILIDAD PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN CHILE. Universidad de Chile.
- Grigg, N. S. (2003). Water Utility Security: Multiple Hazards and Multiple Barriers. *Journal of Infrastructure Systems*, 9(2), 81–88. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0342\(2003\)9:2\(81\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(2003)9:2(81))
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., & Pastén, C. (2017). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(5), 1853–1880. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0050-1>
- INE. (2018). SÍNTESIS DE RESULTADOS CENSO 2017. <https://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf>
- Khatri, K., & Vairavamoorthy, K. (2011). A New Approach of Risk Analysis for Complex Infrastructure Systems under Future Uncertainties: A Case of Urban Water Systems. *Vulnerability, Uncertainty, and Risk*, 4(4), 846–856. [https://doi.org/10.1061/41170\(400\)103](https://doi.org/10.1061/41170(400)103)

- Klise, K. A., Bynum, M., Moriarty, D., & Murray, R. (2017). A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study. *Environmental Modelling and Software*, 95, 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.022>
- Klise, K. A., Murray, R., & Walker, L. T. N. (2015). Systems Measures of Water Distribution System Resilience. In Usepa/Nhsrc (Ng 16) (Issue January). <https://doi.org/10.2172/1177373>
- Lallemant, D., Kiremidjian, A., & Burton, H. (2015). Statistical procedures for developing earthquake damage fragility curves. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(9), 1373–1389. <https://doi.org/10.1002/eqe.2522>
- Li, Y., Gao, J., Zhang, H., Deng, L., & Xin, P. (2019). Reliability Assessment Model of Water Distribution Networks against Fire Following Earthquake (FFE). *Water*, 11(12), 2536. <https://doi.org/10.3390/w11122536>
- Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodriguez-marek, A. (2017). Erratum: Ground-motion prediction equation for the chilean subduction zone (*Bull. Seismol. Soc. Am*, (2017), 107, (901-911), 10.1785/0120160221). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5), 2541. <https://doi.org/10.1785/0120170189>
- NCh1646.Of98. (1998). Grifos de incendio – Tipo de columna 100 mm diámetro nominal – Requisitos generales. Instituto Nacional De Normalización.
- Pagano, A., Giordano, R., Portoghese, I., Fratino, U., & Vurro, M. (2014). A Bayesian vulnerability assessment tool for drinking water mains under extreme events. *Natural Hazards*, 74(3), 2193–2227. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1302-5>
- Piratla, K. R., & Ariaratnam, S. T. (2011). Criticality Analysis of Water Distribution Pipelines. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2(3), 91–101. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000077](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000077)
- Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., & de la Llera, J. C. (2019). An updated recurrence model for chilean subduction seismicity and statistical validation of its poisson nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), 66–74. <https://doi.org/10.1785/0120170160>
- Shamir, U., & Howard, C. D. D. (1979). An analytic approach to scheduling pipe replacement. *Am. Water Works Assoc. J.*, 71(5, May 1979), 248–258. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1979.tb04345.x>

Shinozuka, M., Takada, S., & Ishikawa, H. (1978). Seismic Risk Analysis of Underground Lifeline Systems with the Aid of Damage Probability Matrix. Columbia University, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics.

Su, Y., Mays, L. W., Duan, N., & Lansey, K. E. (1987). Reliability-Based Optimization Model for Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(12), 1539–1556. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1987\)113:12\(1539\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1987)113:12(1539))

SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS. (2016). ESTUDIO TARIFARIO DEFINITIVO EMPRESA ESVAL S.A. PERIODO 2015-2020.

Tabesh, M., Jamasb, M., & Moeini, R. (2011). Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses. *Urban Water Journal*, 8(2), 93–102. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2010.548525>

Zhao, S. J., Xiong, L. Y., & Ren, A. Z. (2006). A spatial-temporal stochastic simulation of fire outbreaks following earthquake based on GIS. *Journal of Fire Sciences*, 24(4), 313–339. <https://doi.org/10.1177/0734904106060786>

Anexo

Resultados de análisis sobre redes experimentales

Sobre la red experimental estudiada, se realiza un análisis considerando las tres amenazas implementadas. Los parámetros para la caracterización de amenaza serán los siguientes:

Tabla Anexo 1: Parámetros análisis sísmico, red experimental.

GMPE	PGA a partir de Idini et. al, 2017
Profundidad hipocentral [km]	35
Tipo de evento	Interplaca
V_{s30} [m/s]	200
Periodo del suelo [s]	0.1
Peak definido en HSVR	Verdadero
Múltiples peaks en HSVR	Falso

Tabla Anexo 2: Parámetros de análisis de deterioro, red experimental.

Año con respecto al que se hace el análisis, t_0	10
Año inicial del rango de análisis	15
Año final del rango de análisis	40
Número de fallas por longitud hasta el año t_0, $N(t_0)$	0.2
Factor de aceleración, A	0.3

Tabla Anexo 3: Parámetros de análisis de FFE, red experimental.

Demanda de control de fuego [m^3/s]	0.016
Duración de incendios [horas]	2
Área construida por habitante [$10^5 m^2$]	$21.5531/10^5$
Número de habitantes por nodo	2000

Se presenta a continuación la curva de amenaza sísmica muestreada, la probabilidad de falla promedio debido a deterioro en las tuberías de la red, y la probabilidad promedio de ocurrencia de 1, 2, y 3 incendios en los nodos de la red, junto a la probabilidad inferida de que no ocurran incendios dada por el complemento de la suma de tales probabilidades. La Figura Anexo 2 presenta un efecto de saturación de la probabilidad de deterioro, llegando al máximo de 1.

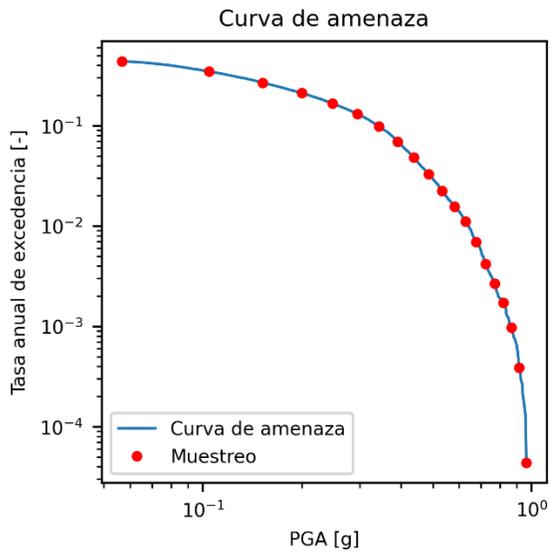


Figura Anexo 1: Curva de amenaza sísmica.

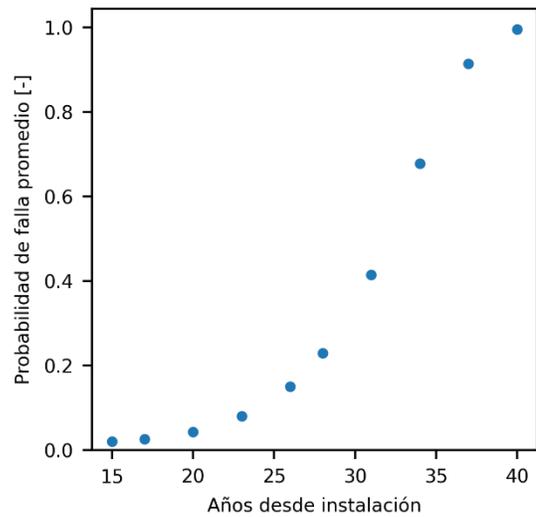


Figura Anexo 2: Probabilidad de falla promedio en la red debido a deterioro.

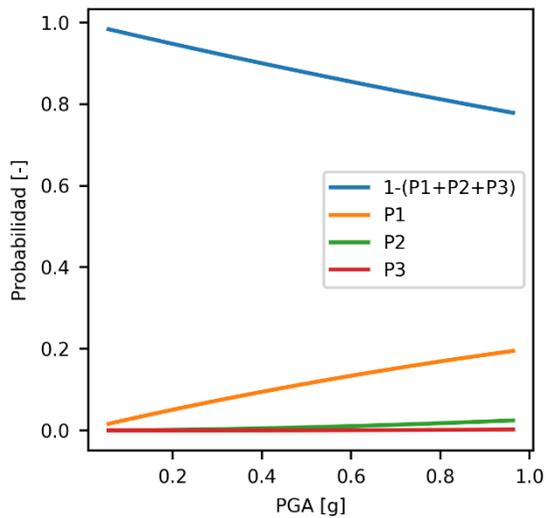
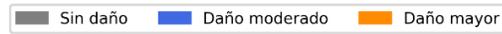
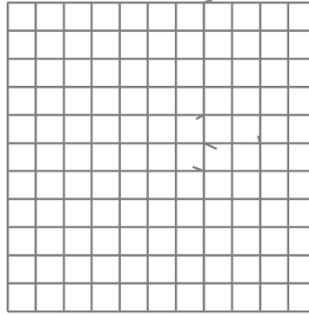


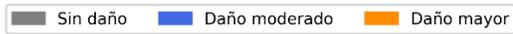
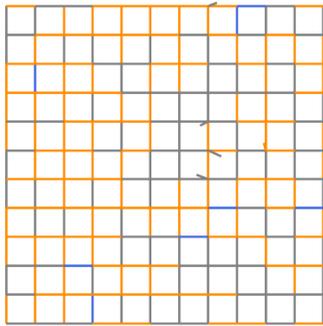
Figura Anexo 3: Probabilidad promedio de 1, 2, 3 incendios y su complemento.

Los mapas de estado de daño obtenido de evaluar los PGA muestreados de la curva de amenaza en la curva de fragilidad se presenta en la Figura Anexo 4, donde el daño incrementa de manera rápida desde los primeros escenarios (b) hasta ser total (e).

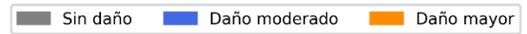
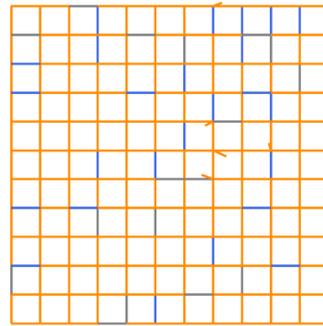
a) Red dañada, escenario sísmico n°1



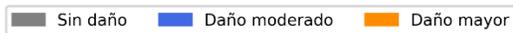
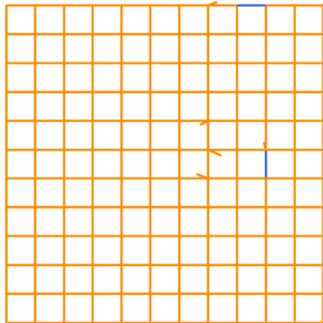
b) Red dañada, escenario sísmico n°8



c) Red dañada, escenario sísmico n°10



d) Red dañada, escenario sísmico n°14



e) Red dañada, escenario sísmico n°20

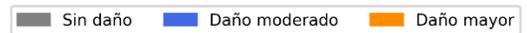
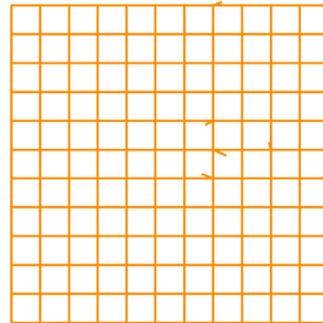
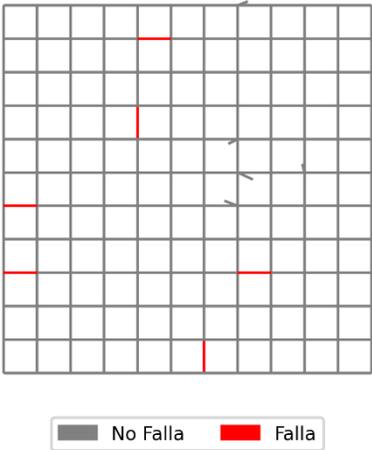


Figura Anexo 4: Mapas de daño debido a amenaza sísmica.

En la Figura Anexo 5 se presentan los mapas de daño obtenidos de evaluar la probabilidad de falla por deterioro, donde el efecto del tiempo generaría fallas en toda la red a 40 años (c).

a) Tuberías que fallan por deterioro, año deterioro 15.0



b) Tuberías que fallan por deterioro, año deterioro 28.0 c) Tuberías que fallan por deterioro, año deterioro 40.0

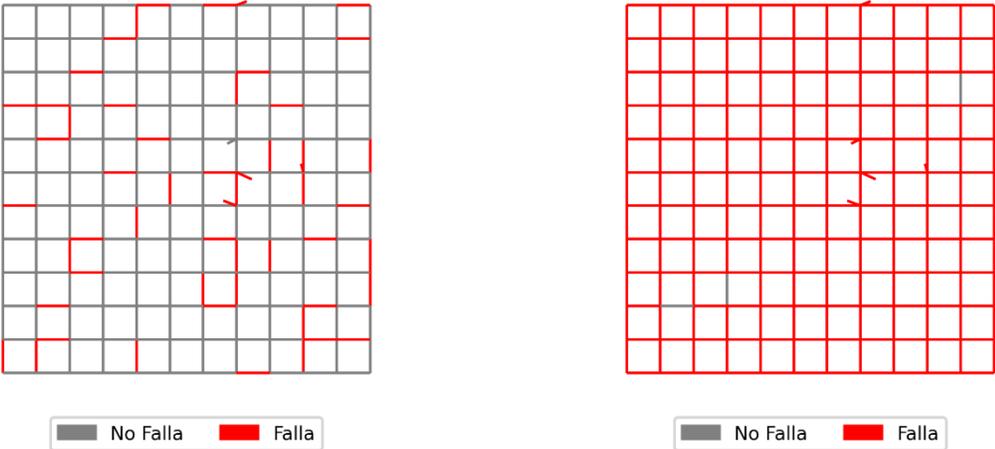
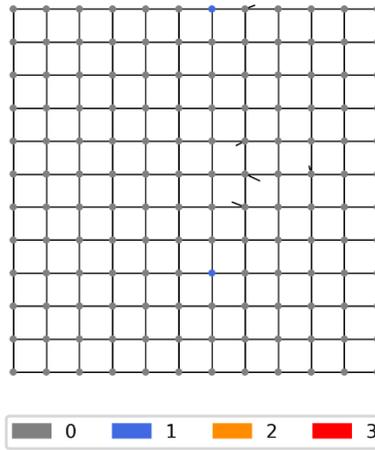


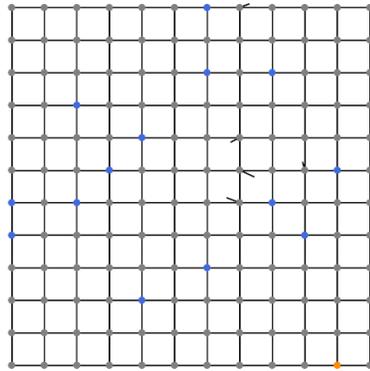
Figura Anexo 5: Mapas de daño debido a amenaza de deterioro.

En la Figura Anexo 6 se presenta el número de incendios por nodo para distintos escenarios de sismo, obtenidos de evaluar la probabilidad de cada número de incendios, donde se aprecia que para el escenario más extremo no se presentan 3 incendios en ningún nodo y gran parte de la red no presenta ningún incendio.

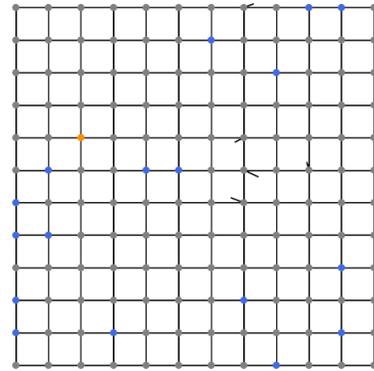
a) N° fuegos, escenario sísmico+FFE n°1



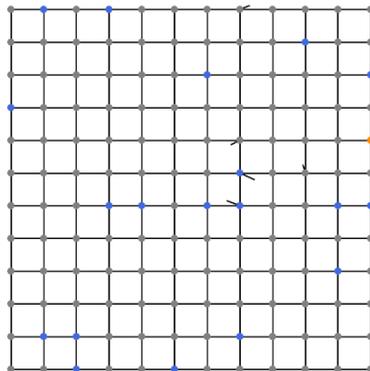
b) N° fuegos, escenario sísmico+FFE n°8



b) N° fuegos, escenario sísmico+FFE n°10



c) N° fuegos, escenario sísmico+FFE n°14



d) N° fuegos, escenario sísmico+FFE n°20

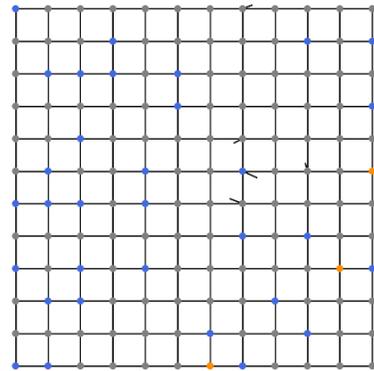
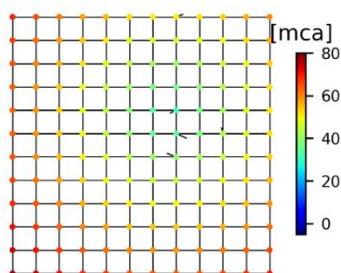


Figura Anexo 6: Mapas de número de incendios.

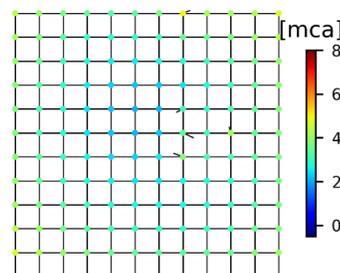
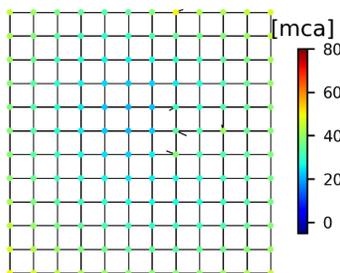
En la Figura Anexo 7 se aprecia que la presión promedio de la red en estado normal está directamente asociada a la distribución de elevación en la red, con una diferencia de cerca de 50 [mca] entre el punto de mayor presión y el de menor. Esta distribución presenta cambios debido al efecto de las amenazas, llevando a una baja total en las presiones de la red de forma tal que la diferencia entre las mayores y menores presiones disminuyen. Los reservorios no se presentan en este mapa, por lo que los nodos conectados a ellos parecieran tener tuberías que no conectan a nada, pero esto permite identificar que los cambios de presión no afectan a los nodos inmediatamente conectados a reservorios.

a) P_{mean} en red, red normal



b) P_{mean} en red, escenario sísmico+FFE N°10 año 28

b) P_{mean} en red, escenario sísmico+FFE N°20 año 28



b) P_{mean} en red, escenario sísmico+FFE N°10 año 40

e) P_{mean} en red, escenario sísmico+FFE N°20 año 40

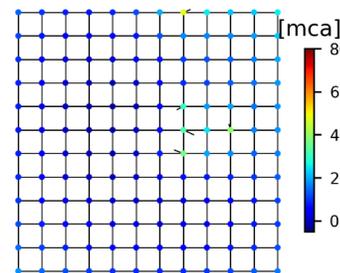
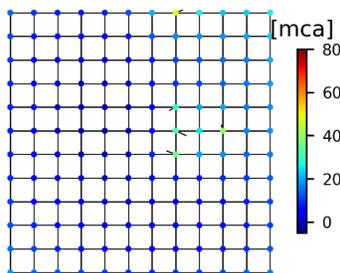
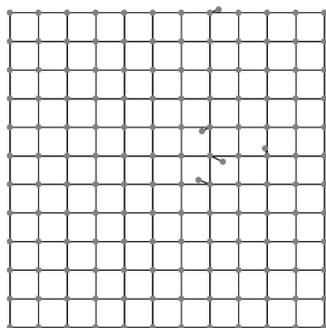


Figura Anexo 7: Mapas de presión promedio en los nodos para distintos escenarios multi-amenaza.

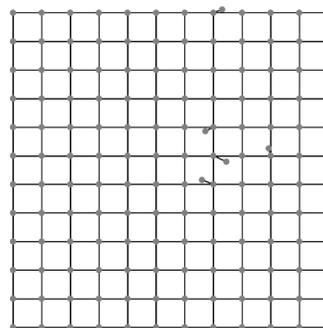
En la Figura Anexo 8 se aprecia de manera más clara algo que también se puede apreciar en la Figura Anexo 7, en esta red las zonas cercanas a reservorios parecieran verse menos afectadas a bajas de presión, lo que se cumple particularmente en los nodos que se encuentran entre reservorios.

a) Incumplimiento de P_{req} escenario sísmico+FFE N°10 año 28



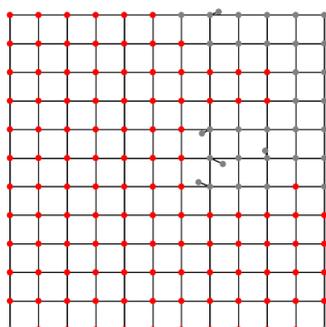
■ Cumple ■ No cumple

b) Incumplimiento de P_{req} escenario sísmico+FFE N°20 año 28



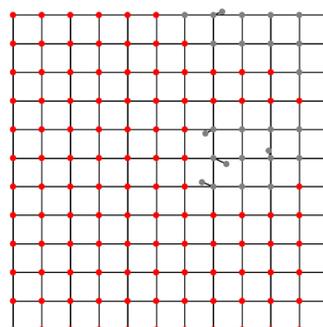
■ Cumple ■ No cumple

c) Incumplimiento de P_{req} escenario sísmico+FFE N°10 año 40



■ Cumple ■ No cumple

d) Incumplimiento de P_{req} escenario sísmico+FFE N°20 año 40



■ Cumple ■ No cumple

Figura Anexo 8: Mapas de incumplimiento de P_{req} .