



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

ESTUDIO DE DAÑOS SÍSMICOS EN REDES DE AGUA POTABLE DEL GRAN CONCEPCIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOAQUÍN ANDRÉS OLIVOS LAGOS

PROFESORA GUÍA:
Yolanda Alberto Hernández

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Yarko Niño Campos
Felipe Villalobos Jara

SANTIAGO DE CHILE
2023

ESTUDIO DE DAÑOS SÍSMICOS EN REDES DE AGUA POTABLE DEL GRAN CONCEPCIÓN

El agua potable es un recurso que hoy por hoy está en crisis, o sea que la demanda de ésta no está siendo cumplida en diferentes zonas del mundo. En Chile, claros son los ejemplos de falta de capacidad de este recurso, principalmente en la zona norte del país. Es bajo este contexto que se crean proyectos que buscan cuidar y aumentar la eficiencia y optimización de uso y distribución del agua. Esta memoria de título, se enfoca en la parte estructural en el proceso de distribución del agua, siendo éstas las redes de tubería, y el cómo se ven afectadas tras diferentes amenazas, como sismos y deterioro a través del tiempo. Parte del análisis se apoya en el modelo de Abarca [2022], un modelo probabilístico que busca analizar redes de agua bajo un marco de riesgo que considera múltiples amenazas. La presente memoria busca mostrar los resultados asociados a las amenazas de sismo y deterioro.

El caso de estudio que se eligió, fue el de la red de agua potable de la ciudad de Concepción. En este trabajo, no sólo se tomaron los datos obtenidos a través del modelo probabilístico desarrollado, sino que también, los datos prácticos de fallas. Dichos datos prácticos, son los datos obtenidos gracias a los daños que sufrió la red para el terremoto del 27 de Febrero del 2010. Así, se analizaron estos antecedentes, para eventualmente correlacionarlos con lo obtenido de forma teórica, estableciendo así, en que medida es útil el modelo.

Parte de este trabajo, fue establecer una metodología estándar para generar la red de agua que requiere el modelo, en su formato y condición necesaria, con el objetivo de crear una guía paso a paso, para ajustar los datos que pueden obtenerse de una red y convertirlos en lo que se requiere.

Para poder plasmar los resultados de los escenarios de amenaza, se utilizaron diferentes métricas, como la disponibilidad de servicio de agua e incumplimiento de presión mínima y requerida. Esta memoria pretende concluir formas en las que se puede mejorar el desarrollo del análisis de redes para posteriores trabajos que busquen optimizar los resultados y funcionamiento de éstas.

Los milagros solo le suceden a quienes no se rinden.

- Emporio Ivankov

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, por su paciencia, a mi novia por su apoyo, a mis amigos por la distensión, a mi perro Elvis por su compañía y a mi mismo por no rendirme en todo este proceso universitario.

Agradezco de gran manera a mi profesora guía la Dra. Yolanda Alberto, quién me introdujo en un tema de mucho interés y me guió de buena manera con su profesionalismo y vasto conocimiento.

Agradezco también a Ariel, Diego y Matías que me ayudaron muchísimo para desarrollar mi memoria.

Vuelvo a mencionar a mis amigos, chupetas y los dondestán, gracias por tantas risas.

Finalmente, gracias especiales a mi Mamá, me has ayudado más de lo que imaginas.

Tabla de Contenido

1. Introducción y Motivación	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.1.3. Resultados Esperados	3
1.2. Alcances	3
1.3. Estructura de Trabajo	4
2. Marco Teórico	6
2.1. Conceptos fundamentales	6
2.1.1. Elementos de Red de Agua	6
2.1.2. Métricas de Redes	7
2.1.3. Amenazas	8
2.2. Antecedentes	8
2.2.1. Contexto	8
2.2.2. Datos Red	9
2.2.3. Recopilación de Datos de Daños	11
2.2.4. Bases y Limitaciones del Análisis	13
3. Metodología	15
3.1. PGA	15
3.2. Curvas de Fragilidad	18
3.3. Modelo de Análisis de Amenazas a Redes de Agua	22
3.3.1. Water Network Tools for Resilience	23
3.4. Métricas de Redes	26
3.5. Escenarios de Amenaza	27
3.5.1. Amenaza Sísmica	28
3.5.2. Amenaza de Deterioro	31
3.6. Red de Agua	32
4. Generación de Red de Agua	34
4.1. Origen y Definiciones de Red	35
4.1.1. Obtener Red en Formato Compatible con Epanet	35
4.1.2. Elevaciones Incorrectas	35
4.1.3. Diámetros No Asignados	36
4.1.4. Diámetros y Elevaciones	36

4.2. Funcionalidad de Red en Epanet y Python	37
4.2.1. Capas Separadas	37
4.2.2. Nodos Desconectados	37
4.2.3. Presiones Negativas	38
5. Resultados	39
5.1. Amenaza Sísmica	40
5.2. Amenaza Deterioro	43
5.3. Métricas Relevantes	46
5.3.1. WSA	46
5.3.2. Incumplimiento de Presión Requerida	50
5.3.3. Incumplimiento de Presión Mínima	51
6. Análisis y Conclusiones	53
6.1. Daños Asociados al 27F	53
6.2. Estados de Daño	56
6.3. Métricas	57
6.4. Correlación Modelo y Datos Reales	57
6.5. Conclusión	58
Bibliografía	60
Anexos	62
A. Diametros.py	62
B. Eliminar_Repe.py	63
C. Escenarios de Desastre	64

Índice de Tablas

2.1.	Distribución de red según diámetros.	9
2.2.	Distribución de red según material.	10
2.3.	Recuento de daños según material y diámetro.	11
3.1.	Sectorización de km de red de AP según PGA.	18
3.2.	Parámetros históricos de Concepción.	28
6.1.	Daños por kilómetro de tubería asociado a valor de PGA.	54

Índice de Ilustraciones

1.1.	Geometría de las zonas para la calibración de parámetros de Gutenberg-Richter (Poulos et al. [2019])	4
2.1.	Red por diámetros	9
2.2.	Red por material	10
2.3.	Fallas en la red de agua de Concepción, asociadas al terremoto del 27 de Febrero de 2010.	11
2.4.	Grados de licuación en Concepción (Falcón et al. [2010]).	12
2.5.	Codificación de colores para mapa en 2.4 (Falcón et al. [2010]).	13
3.1.	Mapa total de distribución de PGA para 27F (USGS).	16
3.2.	Mapa parcial de distribución de PGA para 27F (USGS).	17
3.3.	Curvas de fragilidad sísmica de Ian Garvs considerando incertidumbre en los parámetros de suelo - Valores de PGA entre 0.05[g] y 0.5[g] (Garvs, 2020, p.82 Garvs Martínez [2020]).	19
3.4.	Curvas de fragilidad sísmica de Yoon, para valores de PGA entre 0 [g] y 1.5 [g] (Yoon, 2019, p.11 Yoon et al. [2019]).	21
3.5.	Curvas de fragilidad sísmica de ALAM, para valores de PGA entre 0 [g] y 1 [g].	22
3.6.	Diagrama de flujo de la metodología propuesta (Abarca, 2022, p.2 Abarca [2022]).	23
3.7.	Etapas de análisis de red en estado normal.	25
3.8.	Etapas de análisis de red aplicando amenazas.	25
3.9.	Mapa de sismos considerados para extracción de datos.	29
3.10.	Distribución de magnitud de momento para datos de Concepción.	30
3.11.	Distribución de radio de ruptura hipocentral para datos de Concepción.	30
3.12.	Distribución de PGA utilizando GMPE Idini et al. [2017].	31
3.13.	Desarrollo del análisis de la amenaza de deterioro.	32
3.14.	Probabilidad de falla promedio (con $t_0 = 5$ y $t_{inicial} = 10$).	32
3.15.	Tasa de fallas por kilómetro promedio.	32
3.16.	Red de agua potable de Concepción, introducida en el programa Epanet.	33
4.1.	Elevaciones de red de agua potable de Concepción para análisis de Epanet.	36
5.1.	Curva de fragilidad usada para estudio de rotura de tuberías de red de agua potable de Concepción.	40
5.2.	Curva de amenaza con 20 escenarios sísmicos.	41
5.3.	Escenarios sísmicos de daño relevantes.	42
5.4.	Escenarios sísmicos de fuga relevantes.	43
5.5.	Curva de amenaza con escenarios sísmicos.	44
5.6.	Escenarios de deterioro.	45
5.7.	Máxima diferencia de disponibilidad de servicio, para distintos escenarios sísmicos, en diferentes años de deterioro.	46

5.8.	Disponibilidad de agua considerando amenaza sísmica.	47
5.9.	Disponibilidad de agua considerando escenario sísmico y año de deterioro. . . .	48
5.10.	Curva de riesgo de máxima diferencia de WSA.	49
5.11.	Curva de riesgo de diferencia promedio de WSA.	49
5.12.	Curva de riesgo de máxima diferencia en incumplimiento de presión requerida.	50
5.13.	Curva de riesgo de diferencia promedio en incumplimiento de presión requerida.	50
5.14.	Escenarios de incumplimiento de presión mínima relevantes.	51
5.15.	Curva de riesgo de máxima diferencia en incumplimiento de presión mínima. .	52
5.16.	Curva de riesgo de diferencia promedio en incumplimiento de presión mínima.	52
6.1.	Zonas críticas en Concepción (Guzmán et al. [2012]).	55
.1.	Escenarios sísmicos relevantes.	64

Capítulo 1

Introducción y Motivación

El movimiento telúrico más importante del presente siglo en Chile, ocurrió el 27 de febrero de 2010, 150 km al noroeste de Concepción, presentando una intensidad de Mw 8.8. Como consecuencia, se despliegan muchos problemas de diferente índole, pero los que nos atienen al presente estudio, son, específicamente, los referentes a fallas en la red de agua potable de la ya mencionada ciudad de Concepción. El terremoto puso a prueba la capacidad de respuesta de diferentes competencias relacionadas, llámense, capacidad de identificación de fugas, disminución de períodos de cortes de agua, análisis respectivo del diseño de la red relacionado al movimiento del suelo y principalmente, métodos para la disminución de pérdidas económicas y de recursos hídricos.

Bajo esta problemática, es que nace el proyecto de Riesgo de Pérdidas en Redes de Agua potable (RiPRA), proyecto perteneciente al Centro Avanzado Para Tecnologías del Agua (CAPTA). El proyecto RiPRA posee un enfoque sustentable, con el fin de reducir las pérdidas de agua optimizando el estado de las redes, bajo diferentes situaciones de amenaza, tales como sismos, incendios y deterioros, considerando distintos parámetros, como presión y caudal.

Para llevar a cabo los análisis que pretende el proyecto RiPRA, son necesarias diferentes etapas y procesos, llamados en sí, módulos. El presente estudio está únicamente relacionado al módulo de amenazas, más específicamente, amenazas sísmicas. Es importante notar, que el proyecto, ya lleva un tiempo en desarrollo, realizando diferentes análisis para variadas redes de agua ubicadas en variadas zonas del país. Es por esto que el modelo probabilístico de fallas usado en el presente trabajo, es uno diseñado por Abarca [2022], donde el fin actual y parte de los objetivos incluyen su uso para poder encontrar información relevante y correlaciones importantes entre lo ocurrido el 2010, y los diferentes escenarios sísmicos que se pueden recrear gracias al modelo ya mencionado, el cuál será explicado con mayor detalle más adelante.

El trabajo de título consiste en un caso de estudio, con el objetivo de aplicar herramientas y conocimientos previos asociados al estudio de deterioros de tuberías, en base a la interacción geomecánica entre estas y el suelo que las rodea, esto permitió finalmente estimar daños en términos de intensidad y ubicación.

Se estudió la red de agua potable respectiva a la ciudad de Concepción, correspondiente a la VIII región de nuestro país, la Región del Biobío. Todo esto en el contexto de amenaza sísmica, aludiendo principalmente al terremoto de 2010, desde ahora 27F, un sismo ocurrido a las 03:34:08 hora local (UTC-3) del sábado 27 de febrero de 2010, que alcanzó una magnitud de 8.8 MW. El epicentro se ubicó en el mar chileno, frente a la costa de la entonces Región del Biobío (actual Región de Ñuble), cerca de 150 km al noroeste de Concepción y 63 km al suroeste de Cauquenes, a una profundidad de 30.1 km bajo la corteza terrestre.

La idea de realizar este trabajo, nace de la motivación del estudiante de ser parte del proyecto 2 del CAPTA, el cuál hace alusión a la identificación de fugas y optimización de presiones para la eficiencia en redes de agua potable y el control de pérdidas. Dicha motivación se gesta desde el entendimiento del estudiante de la gran importancia que posee la eficiencia en el uso de los recursos hídricos en nuestro país, y en el mundo, por lo que el presente trabajo puede aportar al desarrollo y optimización de un sistema de análisis de riesgo de pérdidas de agua potable y resiliencia de los sistemas asociados. Dicho sistema en un futuro pretende lograr que se minimicen las pérdidas del recurso, optimizando diferentes variables, desde toma de decisiones, al mejoramiento directo de la infraestructura. El trabajo se enfocará principalmente en la consideración de riesgos que pueden afectar el bienestar de la red, siendo estas amenazas, tanto de deterioro, como principalmente, sísmica.

1.1. Objetivos

A continuación, se detallan los objetivos del estudiante al momento de comenzar a desarrollar el trabajo de título.

1.1.1. Objetivo General

El objetivo general del estudio es determinar curvas de amenaza asociadas a la red estudiada, a través de mapas de daños asociados (existentes como generados), para así lograr un análisis de riesgo que pueda extenderse a redes con topología similar.

1.1.2. Objetivos Específicos

Son:

- Analizar y sectorizar las fallas asociadas a las redes de Agua Potable en la ciudad de Concepción.
- Utilizando los puntos de fallas de tubería, realizar correlaciones con diferentes aspectos geográficos de la zona, sean tipos de suelos, grado de licuación y datos de daños sucedidos como consecuencias de eventos reales.

1.1.3. Resultados Esperados

Así resultados que se esperan, son los siguientes:

- Generar la curva de amenaza asociada a los eventos sísmicos, mostrando todos los escenarios analizados, y realizar mapas de amenazas de las redes de la zona. Para así finalmente, intentar asociar daños sísmicos con diferentes factores, considerando principalmente el aspecto geotécnico del entorno en donde se ubican dichos daños en las redes.
- Aportar al desarrollo del proyecto, desarrollando un caso de estudio con posibilidades de implementación en más casos existentes.
- Facilitar el estudio de daños en redes de agua.

1.2. Alcances

A continuación, se mencionan todas las tareas que van a desarrollarse durante la duración del trabajo de título, con la intención de completar cada uno de los objetivos planteados al comienzo, asimismo, se esclarecen las limitaciones a las que se atiene el trabajo.

- Estudio de bibliografía.

Estudiar la bibliografía correspondiente a análisis hechos sobre el caso del 27F, asimismo, leer documentos que expongan casos internacionales de fallas y daños en redes a raíz de sismos, esto con el fin de ya interiorizar el tema respectivo y poder crear una base sólida de estudio y análisis. En la bibliografía, también se busca explorar diferentes fuentes que resulten en nuevas curvas de fragilidad, que no coinciden con la base del modelo desarrollado por Abarca [2022] en su tesis, para así ampliar el análisis.

- Estudio de datos existentes de redes.

Estudiar, comprender y analizar los datos existentes de las redes de agua en Concepción, esto con el fin de poder implementar el modelo de análisis de redes correctamente, y poder comprender los resultados obtenidos.

- Presentación de información relevante.

Concluida las lecturas de análisis de casos y de la red específica al presente tema, destacar y recopilar los datos de mayor importancia, los cuáles servirán como base para realizar un análisis que considere nociones preconcebidas del fenómeno estudiado.

- Desarrollo de gráficos.

Análisis de todas las métricas que se obtengan a raíz del estudio, disponibilidad de servicio, demanda cumplida, multa, correlación con curvas de fragilidad, grado de licuación, etc. Este es el fin último del presente trabajo, con esto se obtienen los resultados deseados y los mapas de amenaza, donde se aplica todo lo estudiado anteriormente.

Todo lo anterior en sí, implica que el análisis se atiene a ciertas condiciones o limitaciones teóricas en lo que respecta a la red, por esto, no se entrará a estudiar la fragilidad por material de la tubería, asimismo, es importante considerar que los parámetros de suelo usados son estrictamente zonales, mas no regionales o específicos de la ciudad de Concepción, siendo dichas zonas las mostradas en la figura 1.1 (a Concepción le correspondería la zona 3), sacada del estudio “An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of its Poisson Nature” (Modelo de recurrencia actualizado para la sismicidad de subducción chilena y validación estadística de su naturaleza de Poisson) Poulos et al. [2019].

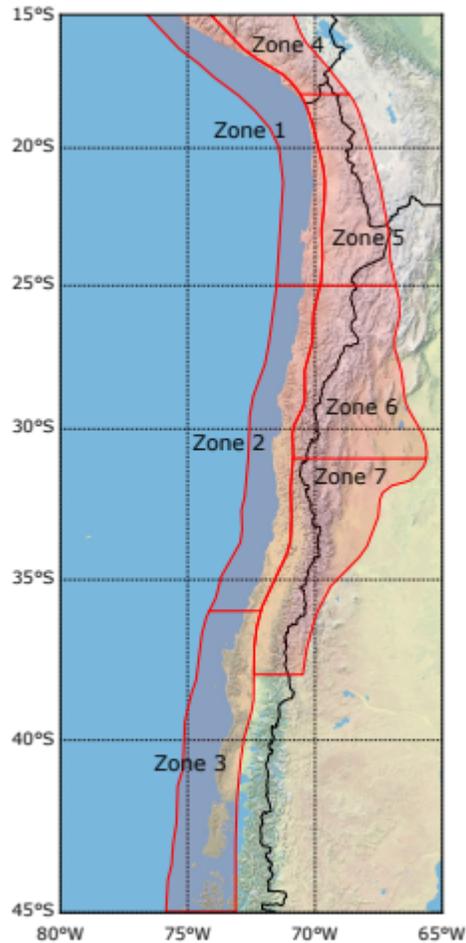


Figura 1.1: Geometría de las zonas para la calibración de parámetros de Gutenberg-Richter (Poulos et al. [2019])

1.3. Estructura de Trabajo

La presente memoria consta de 7 capítulos, más bibliografía y anexo. El presente capítulo (1), expone en términos generales el tema desarrollado y los objetivos de este mismo. El capítulo 1.2 es el alcance del trabajo, donde se enumeran y explican todas las tareas a realizar y desarrollarse dentro de la presente memoria. En el capítulo 2.2, se exponen los antecedentes, los datos duros usados como guía para el desarrollo del modelo comparativo

de la red, tomando en cuenta los datos específicos de la red de agua potable de Concepción, los daños específicos ocurridos en el sismo del 2010 y también el contexto en el cuál se desarrollaron dichos daños. El capítulo 3 desarrolla la metodología técnica a través de la cuál se llegó a los resultados de esta memoria, haciendo un repaso de todos los elementos necesarios para el análisis, tales como programas, códigos, conceptos, mapas y cómo éstos fueron generados. En el capítulo 4, se explica el cómo se desarrolló la red de agua necesaria para llevar a cabo el análisis, explicando todos los desafíos y problemáticas que presentó. El capítulo 5, muestra los resultados obtenidos con el modelo y la red. Finalmente, en el capítulo 6 se lleva a cabo un análisis, tomando en cuenta nuevos mapas y nuevas curvas de fragilidad que no han sido consideradas previamente.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Conceptos fundamentales

2.1.1. Elementos de Red de Agua

En sí, una red de agua potable, es un sistema que permite distribuir, valga la redundancia, agua potable a una cantidad específica de usuarios. El tamaño de la red y la cantidad de usuarios depende generalmente de los recursos de implementación del sector en que se quiera colocar una red, y claramente, el tamaño del sector mismo. Una red de agua potable es un conjunto de distintos elementos que funcionan en bloque para así entregar un correcto servicio.

A continuación, se presentarán y definirán dichos elementos de una red:

- Tuberías: estas son conductos cuyo objetivo es transportar generalmente fluidos, en este caso, agua potable. Estas pueden ser confeccionadas de diferentes materiales dependiendo del uso, entorno y condiciones a las que se vea sometida.
- Uniones: las uniones conforman una parte fundamental de la red. Como bien dice su nombre, su función es unir diferentes elementos (principalmente tuberías) a través de conexiones roscadas de alta presión y alta resistencia. Estas deben ser lo suficientemente robustas para tolerar todo lo que implica el transporte de fluidos en alta presión y las posibles deformaciones del suelo.
- Válvulas: son las responsables de iniciar, detener o regular el circuito de agua.
- Estanque: la función de estos es almacenar agua potable, con fines de siempre poder proveer el volumen de agua necesario que pida la demanda. El tamaño de estos y su altura de agua son variables según lo requerido.
- Reserva: son cuerpos de agua artificiales que almacenan agua potable. Son de grandes dimensiones.

2.1.2. Métricas de Redes

Las métricas son distintos aspectos asociados a una red, que medidos, pueden ayudar a determinar el desempeño de esta.

Fernández Fuenzalida [2021] en su trabajo, usando como base su literatura recopilada, explica dos tipos de métricas:

- Métricas sistémicas:

Las métricas sistémicas estudian el funcionamiento de una red en determinadas condiciones únicas, o sea, índice, red e instante de tiempo único. Los tipos de métricas sistémicas son:

- Estadísticas: El fin de estas es representar al sistema donde lo más relevante es su estructura, tomando como base exclusiva la geometría y topología de la red. O sea, que es posible calcular los valores de estas, sin un modelamiento hidráulico de red.
- Espectrales: Al igual que las estadísticas, el fin de estas es representar la estructura del sistema. Son calculables a partir de eigenvalores y eigenvectores de la matriz de adyacencia que se asocia al gráfico de abstracción de la red de distribución de agua potable.
- Hidráulicas: Tienen el objetivo de representar el comportamiento hidráulico de la red en cada instante, asociado a, valga la redundancia, las variables hidráulicas. Por esto, cuando se usan estas métricas, ya resulta ser necesario un modelamiento hidráulico, y no sólo geométrico y topográfico de la red.

- Métricas elementales:

A diferencia de las métricas sistémicas, las elementales pueden incluir variación tanto temporal como espacial, mientras al mismo tiempo, caracterizan los elementos de una red de forma independiente. Los tipos de esta son:

- Estadísticas: El fin de estas es representar al sistema donde lo más relevante es su estructura, tomando como base exclusiva la geometría y topología de la red, así es como lo importante en un análisis elemental es la posición relativa del elemento mismo. Es posible calcular los valores de estas sin un modelamiento hidráulico de red.
- Hidráulicas: Como se explicó previamente en las métricas sistémicas, es necesario realizar el modelamiento hidráulico de la red para desarrollar estas métricas. Es importante incluir los parámetros clásicos, caudal, presión, flujo, variación de energía, entre otras.

Eventualmente en el capítulo 3, “Metodología”, se desglosan y explican las métricas usadas para realizar un análisis competente. Estas son las presentadas a continuación:

- Water Service Availability (WSA) o disponibilidad de servicio de agua.

- Presión mínima y requerida.
- Riesgo económico o multa.

2.1.3. Amenazas

Los Estados Unidos definieron las infraestructuras críticas como sectores de infraestructura cuyos activos, sistemas y redes, ya sean físicos o virtuales, son considerados tan vitales que su incapacidad o destrucción tendría un efecto debilitante en materia de seguridad, seguridad económica nacional, salud pública, seguridad nacional o cualquier combinación de estos.

Estados Unidos le asigna el estado de infraestructura crítica a infraestructuras de agua potable, otorgándole así, un status de prioridad nacional en lo que a estudios y análisis se refiere. Una de sus entidades destaca el concepto de resiliencia de infraestructura, “*La habilidad de reducir la magnitud y/o duración de eventos disruptivos. La efectividad de una estructura resiliente depende de su habilidad para anticipar, absorber adaptarse y/o rápidamente recuperarse de un potencial evento disruptivo*” (Klise et al. [2020]).

En el análisis de infraestructuras críticas, cada país y zona debe estudiar en detalle que factores característicos de su propia zona son los que representan las mayores amenazas para las ya mencionadas, infraestructuras críticas. El presente caso, como ya sabemos, está situado en Chile, implicando directamente a los sismos como la mayor amenaza existente. Es por esto último, que la amenaza sísmica es la principal y más vital métrica de daño presente en el modelo, porque llevado a un caso real, siempre ha sido este el factor de mayor daño histórico a estructuras en el país sudamericano.

2.2. Antecedentes

2.2.1. Contexto

La ciudad de Concepción, al ser la ciudad de mayor tamaño en ser afectada por el 27F, y por consiguiente la que posee la red de agua de mayor envergadura afectada, pasa a ser un candidato ideal para poder llevar a cabo este análisis, sobre todo dado que en la tesis de Guzmán [2011], se pueden encontrar todos los datos referidos a los daños y fallas que afectaron a la red de agua de Concepción para este acontecimiento. En dicho documento, se explicitan las fallas estructurales en distintos puntos de la red, considerando el diámetro y material de la tubería dañada. En base a esto, a través de la recopilación y localización de los datos de fallas, es que se pueden realizar análisis correlativos a la probabilidad de falla de estos, utilizando curvas de fragilidad, y para este caso, PGA (peak ground acceleration).

2.2.2. Datos Red

La red de agua potable de Concepción posee 540.27 km de longitud, en la tabla 2.1 se muestra la totalidad de la red clasificada por diámetros, exponiendo al mismo tiempo el número de tuberías asociadas a cada diámetro, la longitud total de cada grupo y el porcentaje de estos en relación al total de la red. Los datos están basados en lo recopilado en la tesis de Guzmán [2011].

Tabla 2.1: Distribución de red según diámetros.

Diámetros [mm]	Cantidad	Longitud [Km]	%
Pequeños $30 \leq D \leq 110$ [mm]	10932	346.18	64 %
Medianos $110 < D < 500$ [mm]	3960	177.24	33 %
Grandes $500 \leq D \leq 1000$ [mm]	84	16.67	3 %
Indeterminado	10	0.18	0 %
Total	14986.00	540.27	100 %

Se presenta la figura 2.1, que busca plasmar los datos expuestos en la tabla 2.1, realizando así una asociación entre los diámetros de las tuberías de la red y su posición.

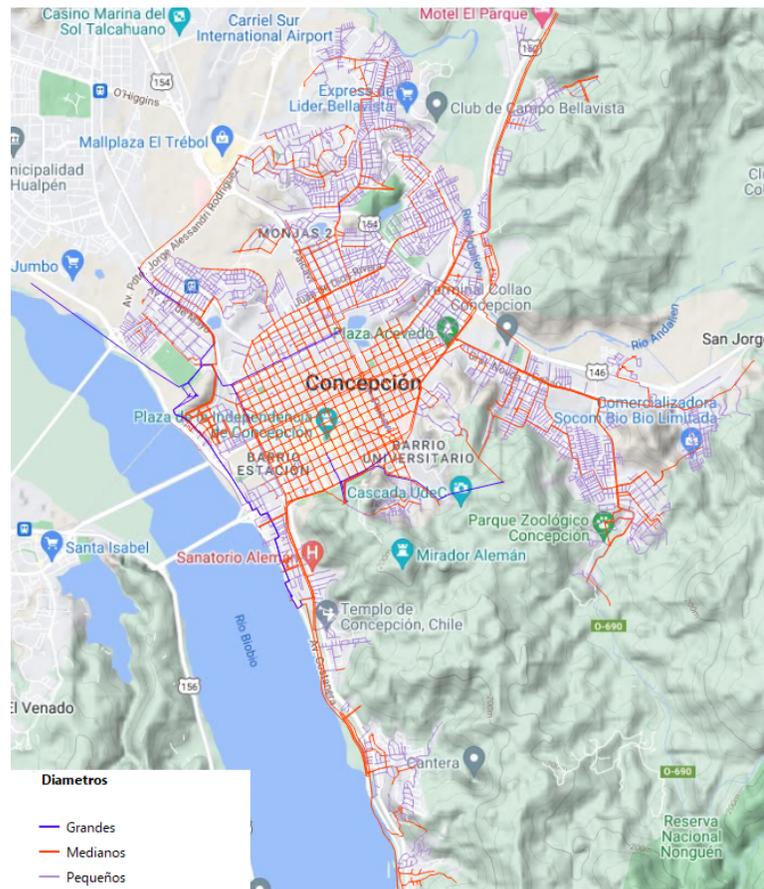


Figura 2.1: Red por diámetros

La tabla 2.2 presenta todos los materiales para tuberías existentes en la red, cuántos km abarcan cada uno, y el porcentaje asociado de cada material con respecto a la red completa, acompañándole, se tiene la figura 2.2, esta presenta la red de agua potable de la ciudad de Concepción, dividida por colores según el material de la cuál está hecha cada sección correspondiente, los datos están asociados a la tabla referenciada en este mismo párrafo.

Tabla 2.2: Distribución de red según material.

Materiales	Suma de Longitud [Km]	%
Asbesto-Cemento (AC)	173.3	32 %
Acero	40.8	8 %
Hierro Fundido Dúctil (FFD)	87.6	16 %
Hormigón Armado (HA)	0.3	0.05 %
Poliétileno de Alta Densidad (PEAD)	2.4	0.44 %
Policloruro de Vinilo (PVC)	235.8	44 %
Indeterminado	0.2	0.03 %
Total general	540.27	100 %

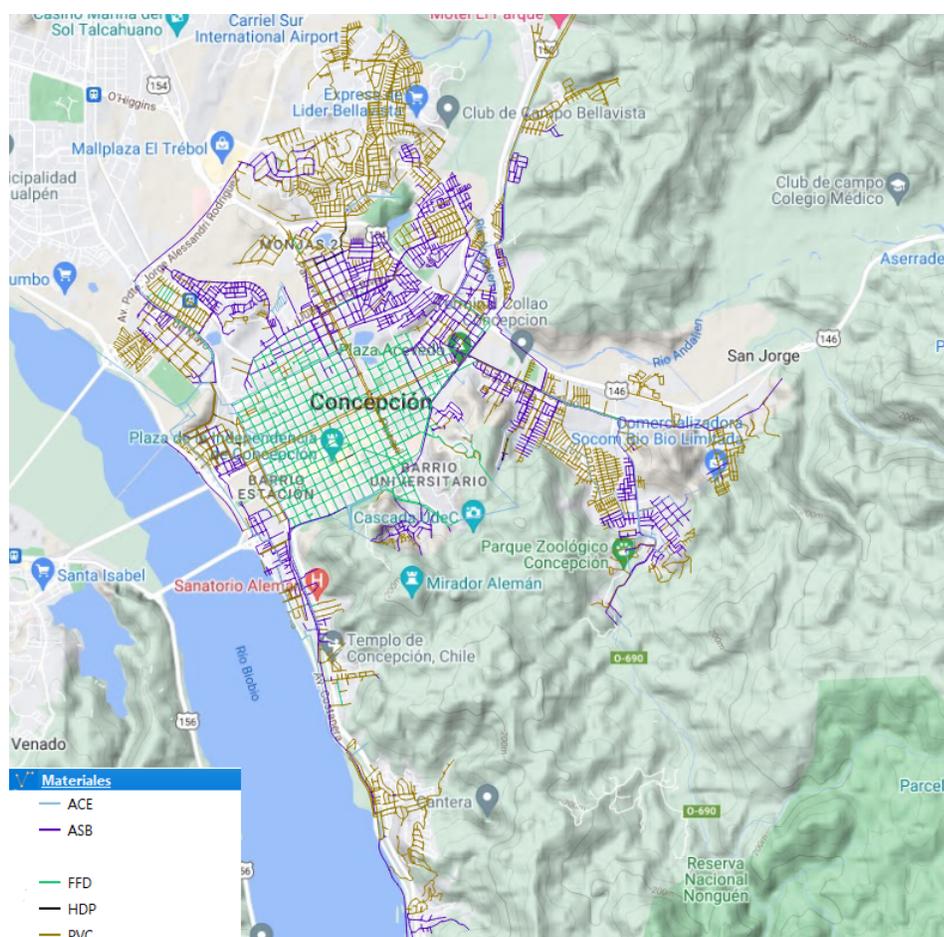


Figura 2.2: Red por material

2.2.3. Recopilación de Datos de Daños

Los datos de daños relacionados al 27F para la ciudad de Concepción se extrajeron de Guzmán [2011], en conjunto con los motivos asociados. Se tomaron todos los daños y se ubicaron en el lugar de la red de agua potable donde ocurrieron, esto con el fin de eventualmente crear asociaciones que puedan ser útiles, usando los resultados que arroje el modelo probabilístico. Dicho mapa está en la figura 2.3.

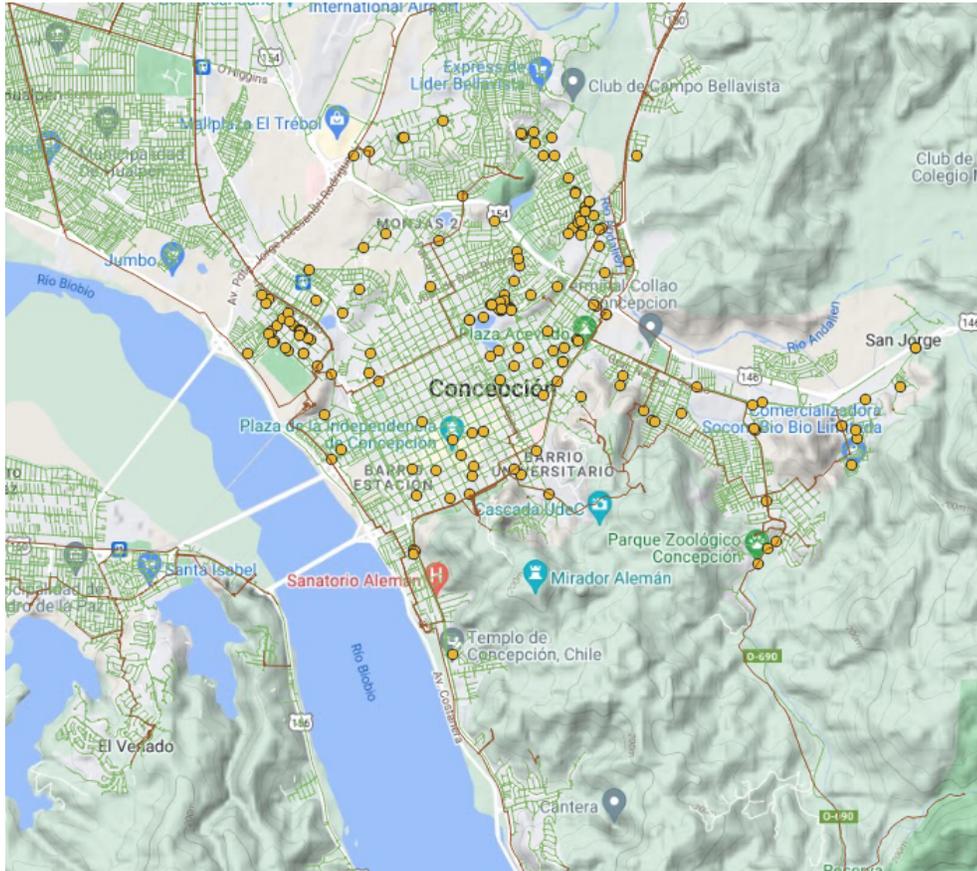


Figura 2.3: Fallas en la red de agua de Concepción, asociadas al terremoto del 27 de Febrero de 2010.

Por otro lado, se establece la existencia de 163 daños, estos clasificados según material y diámetro en la tabla 2.3:

Tabla 2.3: Recuento de daños según material y diámetro.

Material/Diámetro [mm]	75	90	100	110	125	140	150	160	200	250	300	400	500	Total
AC	11		46				4		3	7	1	1		73
ACERO									1		1			2
FFD			14				10		3	1			1	29
PVC		3		47	2	1		1	1	3			1	59
Total	11	3	60	47	2	1	14	1	8	11	2	1	2	163

La tabla 2.3 pareciera dar a entender cierta fragilidad asociada a determinados materiales y diámetros, pero es importante recordar las tablas 2.1 y 2.2, que explicitan la existencia mayoritaria de, por ejemplo, tuberías pequeñas de AC o PVC, concluyendo que existe una mayor cantidad de fallas, simplemente por una mayor existencia de estas tuberías.

Asociado a esto, otro mapa que es importante revisar y será útil para realizar conclusiones, es el mapa que nos otorga Falcón et al. [2010] (presentado en la figura 2.4), donde podemos observar los niveles de licuación en la zona de estudio, siendo evidentemente un factor importantísimo al momento de analizar fallas en redes de agua potable asociada a un terremoto. En la figura 2.5, se expone que significa cada color codificado.

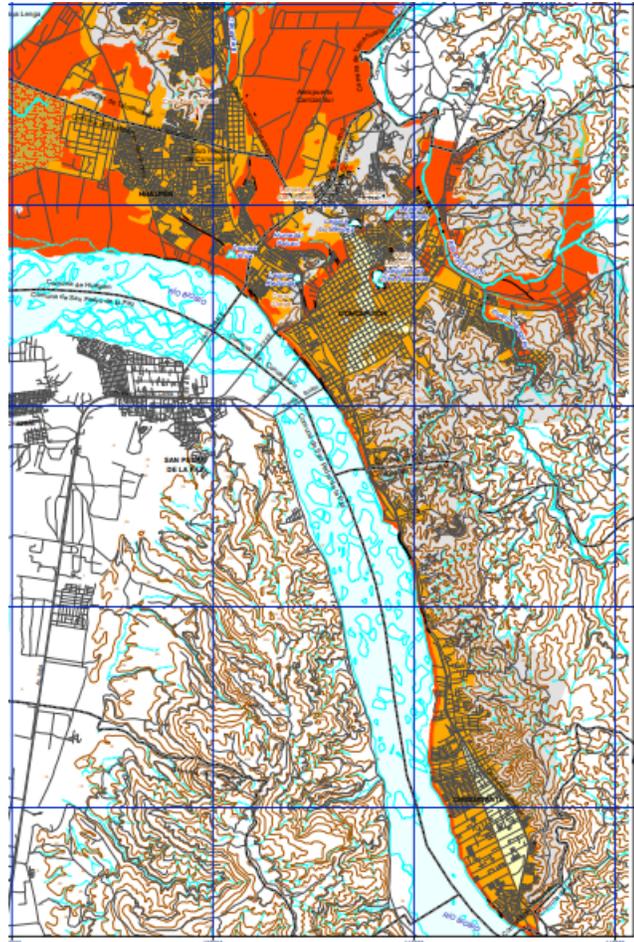


Figura 2.4: Grados de licuación en Concepción (Falcón et al. [2010]).

GRADO DE PELIGRO	DESCRIPCIÓN
<p>Alto</p> 	<p>Terrenos altamente susceptibles de experimentar licuefacción. Corresponden a suelos formados por sedimentos no consolidados de baja compactación y saturados de agua. En este mapa se trata, principalmente, de arenas depositadas en ambientes fluviales, eólicos, litorales y en menor medida aluviales. Una característica común que hace altamente licuable a estos depósitos es que se encuentran permanentemente saturados en agua, con un nivel freático muy somero ubicado entre la superficie y los 5 m de profundidad. En general, esta zona presenta grandes espesores de sedimentos propensos a ser licuados, por lo que la magnitud de la licuefacción es aún mayor.</p> <p>En el área de estudios estos suelos se encuentran en los humedales de Lengua, Paicaví, Andalien y Rocuant, en los bordes de las lagunas Las Tres Pascualas, Redonda, Lo Custodio, Lo Galindo y Lo Méndez, en las planicies de inundación del río Biobío en la ciudad de Concepción y la comuna de Chiguayante, en las planicies de inundación del río Andalien, estero Nonguén, en Concepción, y en las planicies litorales del borde costero de la ciudad de Talcahuano y la comuna de Hualpén. Todos estos suelos tienen una muy alta susceptibilidad a licuarse frente a futuros sismos. La ciudad de Talcahuano, de acuerdo a la zonificación, presenta un alto porcentaje de suelos licuefactables, sobre los cuales se ha construido la ciudad. El terremoto posiblemente produjo licuefacción en muchos suelos, sin embargo, el posterior tsunami eliminó las evidencias de este fenómeno. El Municipio de Talcahuano, a mayo del presente, estima que en la comuna hay 6.600 viviendas destruidas o que deberán ser demolidas, mientras que otras 15 mil tienen daños estructurales, que requieren reparaciones.</p>
<p>Medio</p> 	<p>Terrenos de susceptibilidad media a experimentar licuefacción. Corresponden a suelos naturales compuestos por sedimentos no consolidados, de baja a media compactación, constituidos por arenas y arenas limo-arcillosas y, algunos de ellos, cubiertos por rellenos antrópicos. Se trata, principalmente, de arenas depositadas en ambientes fluviales y eólicos interdigitados con depósitos aluviales (escombros de falda y otros). El espesor de estos suelos es variable y se caracterizan por presentar un nivel freático somero, en general, entre 0 y 5 m de profundidad. Se ubican principalmente entre humedales, en los bordes de los cerros islas y Cordillera de la Costa, donde existe descarga de vertientes hacia antiguos humedales, actualmente rellenos con depósitos antrópicos. En esta zona se observa, principalmente, agrietamiento del suelo y subsidencia del mismo. Respecto a las grietas, estas se concentran en los límites con las zonas de alto peligro. En la ciudad de Concepción corresponden al casco antiguo, el más densamente poblado, donde debido al sismo se produjeron daños en miles de viviendas. Al mes de Mayo de 2010, se habían catastrado 2.733 unidades (4%) destruidas, 3.575 (5%) con daños severos, y otras 30 mil 290 (38%) tienen daños moderados (Catastro Municipalidad de Concepción).</p>
<p>Bajo</p> 	<p>Terrenos de baja susceptibilidad a experimentar licuefacción. Corresponden a suelos de origen fluvial con un nivel freático entre 5 y 10 m de profundidad. Estas zonas se ubican en el centro de Concepción, y en el borde oriental de la península de Tumbes, en este último caso se debe al escaso espesor de los suelos licuefactables.</p>

Figura 2.5: Codificación de colores para mapa en 2.4 (Falcón et al. [2010]).

2.2.4. Bases y Limitaciones del Análisis

En el trabajo de Garvs Martínez [2020] se desarrollan GMPE que funcionan como base para las curvas de fragilidad usadas en el análisis de los resultados de esta memoria.q Dichas curvas de fragilidad toman como base modelos numéricos que consideran el comportamiento de los suelos presentes en el territorio chileno, dejando espacio para posteriores ajustes.

Las condiciones consideradas fueron las siguientes:

- Tuberías de asbesto-cemento caracterizadas según la norma chilena.
- Parámetros geotécnicos de suelo reales, descripciones de suelos a lo largo de todo Chile.
- Parámetros de resistencia obtenidos por medio de la búsqueda de resultados ensayos SPT.
- Intensidad sísmica generada utilizando una distribución de sismos para Chile, junto a una GMPE (Idini et al. 2017).
- Incertidumbre en parámetros geotécnicos de suelo y su propia interacción con las tuberías.
- Se modela el efecto del suelo como resortes equivalentes adheridos a la estructura.

El modelo en si genera bastantes valores de deformaciones de las tuberías, integrando estados de daño, los cuáles se definen de la siguiente forma:

- Menor: cualquier valor de deformación de fluencia menor al 70 %.
- Moderado: se alcanza un 70 % de deformación de fluencia.
- Mayor: se alcanza la deformación de fluencia.

Todo lo anterior en sí, implica que el análisis se atiene a ciertas condiciones o limitaciones teóricas en lo que respecta a la red, por esto, no se entrará a estudiar la fragilidad por material, asimismo, los parámetros de suelo usados son estrictamente zonales, mas no regionales o específicos de la ciudad de Concepción, siendo dichas zonas las mostradas en la figura

Capítulo 3

Metodología

A continuación, se presentan los aspectos y variables relevantes del trabajo, cada sección juega un papel fundamental en el desarrollo de las curvas y los mapas de amenaza, los cuales son los resultados importantes de esta memoria.

3.1. PGA

Con el fin de poder establecer un parámetro de análisis, primero fue necesario decidir en base a qué se realizaría el estudio de como afecta un sismo a la zona en donde este ocurre. Como sabemos, el aspecto sísmico presenta diversas amenazas que pueden ser identificadas como parámetros. Dichos parámetros pueden determinar y clasificar finalmente el como la intensidad del sismo puede afectar a las estructuras, utilizando el suelo como medio de análisis. Existe, por ejemplo, el *permanent ground deformation* (PGD), el cuál hace referencia, en su traducción literal, a la deformación permanente que sufre el suelo tras el suceso de un evento telúrico. Asimismo, se tiene el *peak ground velocity* (PGV), que pretende cuantificar y detallar los movimientos continuos del suelo, usando las ondas sísmicas como dato. Finalmente, llegamos al parámetro que nos importa, y el cuál se convierte en la principal fuente de análisis para el presente trabajo, el PGA, *peak ground acceleration*.

El PGA detalla la aceleración del suelo correlativa a la intensidad de un sismo. En sí, es un parámetro importantísimo al momento de diseñar estructuras sísmicas resistentes, para predecirlo, es necesario tener en consideración el historial sísmico de la zona de estudio, explican Philip and Santhi [2020]. Más en concreto, el PGA es lo que experimenta una partícula de suelo durante un sismo en términos de cambio de aceleración, logrando así que las estructuras afectadas experimenten, en consecuencia, aceleraciones espectrales. El PGA ha demostrado ser una fuente confiable y viable de análisis, en sí mismo, y en su generación de Ground Motion Prediction Equations (GMPE), las cuáles resultan en curvas de fragilidad. Como veremos más adelante, los modelos que tomaremos usan el PGA, más otras consideraciones para encontrar formás de predecir comportamientos de daño y ruptura en las redes.

Dada la recurrencia existente de sismos en Chile, no es difícil encontrar los datos de diferentes medidas de intensidad. Estos están disponibles para diferentes eventos, relevante para el presente análisis, se tiene el mapa de PGA del 27F presentado en la figura 3.1, éste se obtuvo desde la página de la USGS, donde se pueden recopilar los datos históricos de terremotos y obtener la distribución de aceleraciones máximas horizontales como mapa (formato *.shp*). Se presentan dos figuras, la figura 3.1 presenta el mapa que expone todos los lugares afectados en el 27F a los que se podría obtener los valores (los cuales no se muestran dado que se abarcan lugares que no son de relevancia) de PGA, mientras que la figura 3.2, presenta únicamente los valores existentes en la zona de estudio.

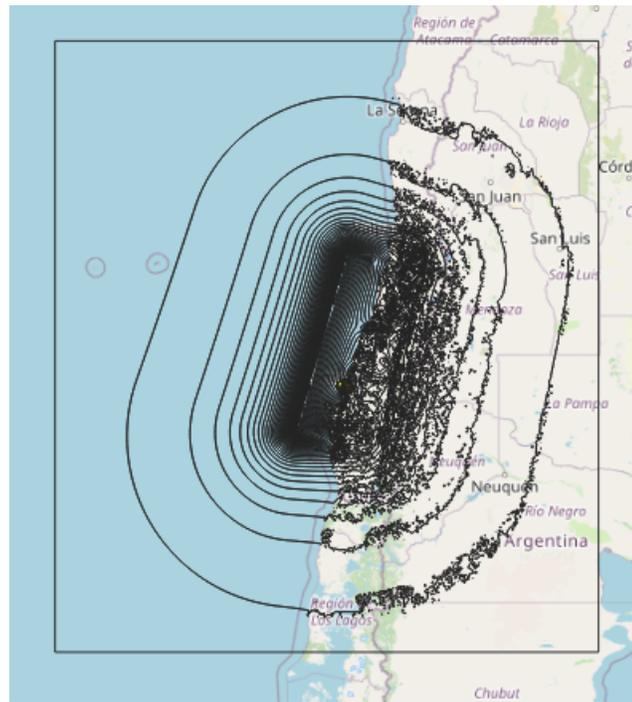


Figura 3.1: Mapa total de distribución de PGA para 27F (USGS).

Tabla 3.1: Sectorización de km de red de AP según PGA.

PGA [g]	Longitud [km]
0.38	20.76
0.4	126.53
0.42	178.48
0.44	89.09
0.46	81.48
0.48	42.30
Total	538.64

3.2. Curvas de Fragilidad

Como se discutió anteriormente, el PGA es finalmente una medida de intensidad (IM de aquí en adelante) que a través de diferentes procesos termina siendo la base de una curva de fragilidad. Por lo que el paso lógico de este trabajo, era seleccionar una curva de fragilidad. Esta, debía usar el PGA como medio de análisis, y estar confeccionada en base a datos que fuesen relevantes para el presente estudio. Finalmente, se toma la decisión de utilizar lo desarrollado por Garvs Martínez [2020].

El PGA es una de las medidas principalmente usadas para estimar los daños de infraestructuras críticas, en base a esto, se generan las curvas de fragilidad necesarias, que, en concreto, son las representaciones gráficas que ayudan a comprender la función que estima acumuladamente la probabilidad de alcanzar y exceder un estado de daño específico (NIBS [1999]), generalmente denominados daño menor y mayor, de una estructura que responde a un evento sísmico.

Para eventualmente generar una GMPE, que se expondrá como curva de fragilidad en un gráfico de daño vs PGA, es necesario considerar diferentes factores, en el presente trabajo, se discute y analizan diferentes curvas de fragilidad.

Es importante aclarar, que el modelo probabilístico generado por Abarca [2022], el cuál proveerá los gráficos necesarios para el análisis de la red de Concepción, se basó en la GMPE generada por Garvs Martínez [2020], las otras curvas de fragilidad, son para llevar a cabo análisis complementarios en la sección que corresponda.

En la sección 2.2.4, se explican las condiciones que impone el análisis desarrollado en Garvs Martínez [2020] para generar sus GMPE y curvas de fragilidad, basándose en Yoon et al. [2019], el cambio en las curvas se logra a través de forzar una distribución log-normal del resultado y optimizar la ecuación de probabilidad. Se generan valores de promedio y desviación log-estándar para cada curva de fragilidad asociada al PGA que se ha obtenido, considerando aproximadamente 0.22 y 0.4 como daño mayor, y 0.17 y 0.3 como daño moderado. Es importante mencionar que datos prácticos están involucrados (Jacobson and Grigoriu [2008]).

La curva de fragilidad resultante de Ian Garvs es la mostrada en la figura 3.3:

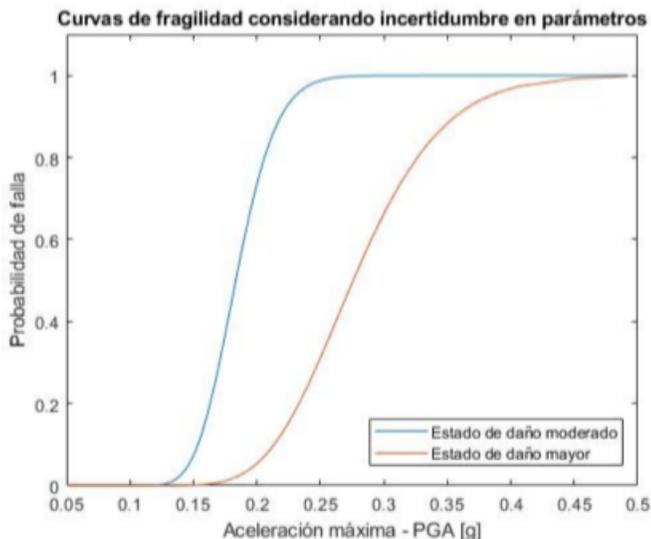


Figura 3.3: Curvas de fragilidad sísmica de Ian Garvs considerando incertidumbre en los parámetros de suelo - Valores de PGA entre 0.05[g] y 0.5[g] (Garvs, 2020, p.82 Garvs Martínez [2020]).

Es importante tener en cuenta que, en este modelo, la tubería es considerada un elemento esbelto, esto hace que sea susceptible al pandeo (no considerando restricción lateral), el cuál no está considerado como efecto principal, ya que se estudia la rotura únicamente por tracción. También es relevante recordar que se reconoce, que el hecho de que la interacción del suelo se estudie como interacción con resortes lineales es una idealización de este mismo y su comportamiento, considerando así, que sólo su comportamiento mecánico esté aportando rigidez y desplazamientos locales, dejando de lado los posibles factores externos dentro del sistema. En concreto, el modelo y los valores entregados para la deformación y el esfuerzo interno de la tubería, corresponden al comportamiento de una tubería de asbesto-cemento idealizada y simplificada (Garvs Martínez [2020]).

Es evidente que el trabajo de Yoon es lo que influencia fuertemente lo desarrollado por Ian Garvs. Por esto, hacer un repaso de este y tomarlo como punto de comparación es relevante.

Lo que Yoon plantea es que ya se han hecho diferentes estudios asociados a la interacción suelo-estructura, considerando incertidumbre con respecto al suelo y estructura en sí. También comenta que ya se han realizado estudios a tuberías enterradas segmentadas, donde se considera también, incertidumbre en el suelo y se intenta estudiar la respuesta de las tuberías, pero, que no se han realizado estudios que utilicen un análisis de respuesta no lineal tiempo-historia, considerando inelasticidad del material y no linealidad geométrica. Comenta que finalmente los estudios sólo se enfocan en buscar la relación de fragilidad sísmica entre la intensidad del sismo mismo y el desempeño estructural, lo que provoca que la mayoría de estudios sea para estructuras sobre el nivel del suelo, dejando fuera parámetros geotécnicos importantísimos en el estudio de respuesta estructural a terremotos.

En base a estas definiciones, Yoon et al. [2019] modela un análisis de fragilidad sísmica para tuberías enterradas, que considera el ya mencionado análisis de respuesta no lineal tiempo-historia, que toma las tuberías como elementos de viga y el suelo aledaño como resortes equivalentes, donde la interacción de estos se representa utilizando un modelo para la interacción suelo tubería llamado BNWF (beam on nonlinear-Winkler foundation).

Teniendo lo anterior como base del modelo, Yoon también considera ciertas condiciones especiales para modelar su curva de fragilidad, las consideradas fueron las siguientes:

- Tuberías de gas API 5L X65 muy comunes en Corea del Sur. El material de la tubería es acero y posee un diámetro externo de 762 [mm] e interno de 727 [mm].
- La tubería esta fija y restringida en ambos extremos.
- Cargas vivas y muertas aplicadas en la superficie del suelo son obviadas.
- Presión interna del fluido en la tubería no es considerada.
- Nivel del agua es bajo la ubicación de la tubería (no hay empuje de agua).
- Se considera incertidumbre en parámetros de suelo geotécnicos y su propia interacción con las tuberías.
- Se modela el efecto del suelo como resortes lineales equivalentes adheridos a la estructura.

Yoon profundiza en su análisis considerando también la posible variación de diferentes factores, tales como ángulo de fricción interna, cohesión y peso unitario del suelo. A raíz de esto, genera curvas de fragilidad asociadas a estos factores, nos interesa únicamente la que considera la variación de todos los parámetros al mismo tiempo. Realizando un análisis de sensibilidad para todos estos parámetros y un consiguiente análisis de fragilidad sísmica, Yoon obtiene la curva de fragilidad (figura 3.4).

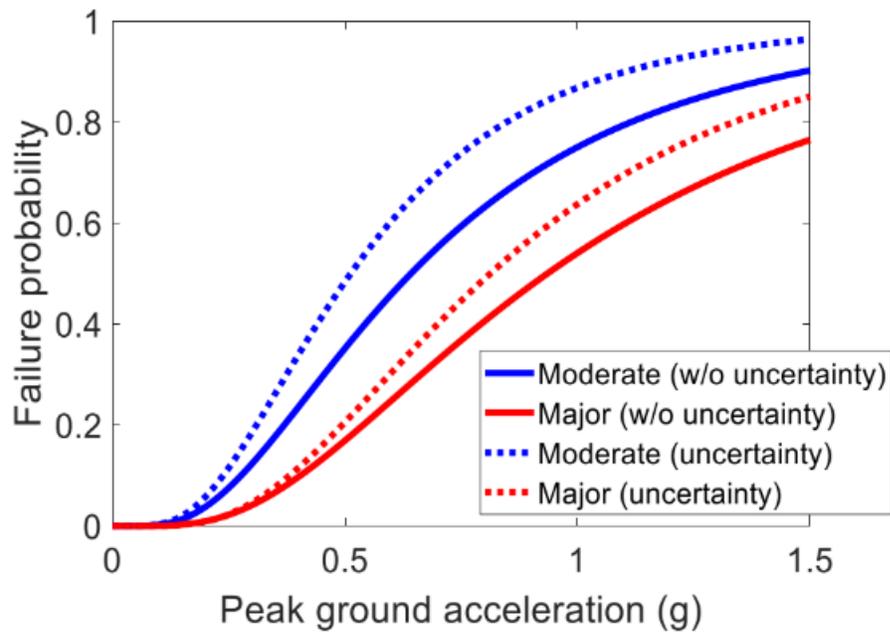


Figura 3.4: Curvas de fragilidad sísmica de Yoon, para valores de PGA entre 0 [g] y 1.5 [g] (Yoon, 2019, p.11 Yoon et al. [2019]).

Un caso no directamente citado ni relacionado es lo generado por la American Lifeline Alliance (ALAM), este es un proyecto estadounidense fundado por la agencia federal de manejo de emergencias (FEMA) y manejado por el Instituto Nacional de Ciencias Estructurales (NIBS), el cuál tiene como objetivo reducir los riesgos sufridos por infraestructuras críticas al momento de ocurrir una amenaza.

En el documento citado en el título de esta sección, ALAM desarrolla curvas de fragilidad para el análisis de daño a infraestructuras de tuberías de agua usando diferentes IM, como ya se ha establecido, nos centraremos en la curva desarrollada para PGA.

Previo a esto, es importante explicar que a diferencia de las curvas de fragilidad anteriormente mencionadas, la presente es desarrollada únicamente en base a datos empíricos de daño por terremotos, evitando tomar supuestos y estableciendo las características reales de cada red de agua según ubicación y época en que ocurrió cada sismo estudiado. Ejemplos de estas características reales, son las siguientes:

- 75 % a 90 % de las tuberías instaladas antes de 1945 en Estados Unidos son de acero inoxidable.
- Tuberías de asbesto cemento eran usualmente de hasta 12 pulgadas desde 1945 a 1985, y no se usan actualmente.
- Tuberías de acero soldado se usan desde los 1900 en adelante, sobre todo para tuberías de mayor diámetro. Las soldaduras hechas previo a 1940 son de mala calidad.

En base a la enumeración anterior, podemos establecer que las “condiciones” establecidas para el desarrollo de la curva de fragilidad son muy específicas y asociadas a cada caso de ocurrencia de amenaza (si se quiere leer más sobre estas condiciones se recomienda ir a ALAM, 2001, p. 11, [Alliance, 2001]).

A continuación, se enumeran lo que consideran principales factores de daño o posible daño a tuberías enterradas:

- Temblores.
- Deslizamientos de tierra.
- licuación.
- Asentamiento.
- Anexidades y ramificación.
- Deterioro por antigüedad y corrosión.

Establecido lo anterior, se presenta la curva de fragilidad para PGA (figura 3.5) desarrollada por esta entidad (Alliance [2001]).

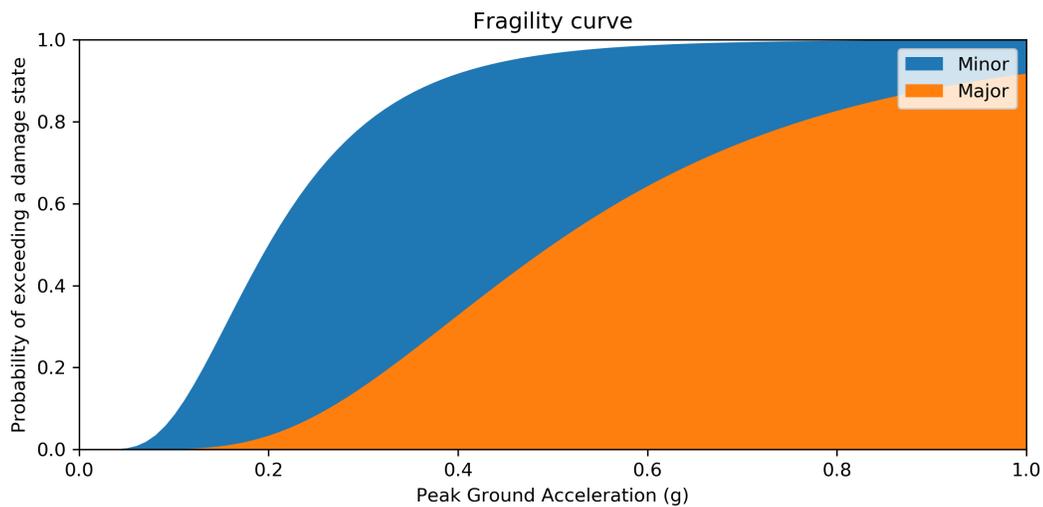


Figura 3.5: Curvas de fragilidad sísmica de ALAM, para valores de PGA entre 0 [g] y 1 [g].

3.3. Modelo de Análisis de Amenazas a Redes de Agua

Eventualmente, nace la necesidad de tener un medio por el cuál analizar las redes y su comportamiento, bajo los estándares de lo expuesto en las dos secciones anteriores. Es por esto

que se considera el modelo desarrollado por Abarca [2022]. Este busca avanzar el desarrollo del Proyecto 2 del CAPTA (Centro Avanzado Para Tecnologías del Agua), como ya mencionamos anteriormente, el proyecto RiPRA. El objetivo principal del proyecto es, concisamente, plasmar o cuantificar el riesgo de pérdidas en redes de agua, intentando así, al mismo tiempo, desarrollar técnicas y maneras establecidas en las cómo lidiar con los problemas de pérdidas de agua asociado a diferentes factores, proporcionando un sistema de soporte de decisiones que aumente la eficiencia de las redes.

El modelo desarrollado para el análisis se genera en el módulo de Python, WNTR (Water Network Tools for Resilience), este busca tomar una red y simularla desde su estado original, tomando variables específicas según corresponda. Abarca [2022], presenta un diagrama de flujo (figura 3.6) que explica su propuesta de trabajo para un análisis multi-amenaza, el cuál es idéntico al presentado a continuación.

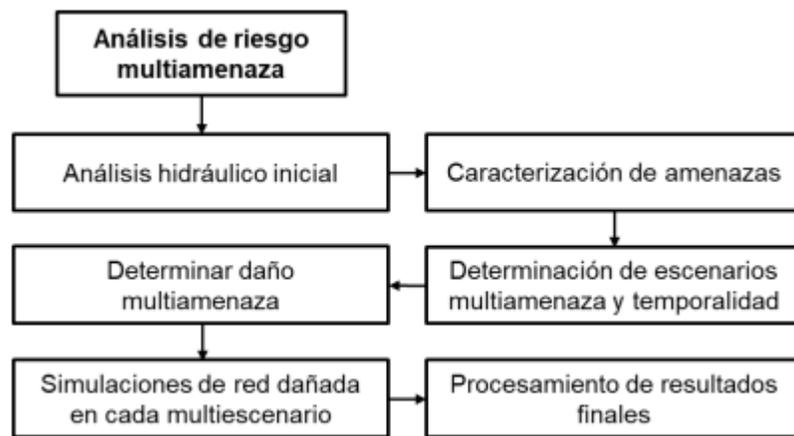


Figura 3.6: Diagrama de flujo de la metodología propuesta (Abarca, 2022, p.2 Abarca [2022]).

El diseño propuesto por Abarca [2022] contempla un análisis con respecto a daños a raíz de amenazas de incendios asociados a sismos, es importante destacar que en el presente trabajo sólo se implementarán los análisis respectivos a la amenaza sísmica a las que se ve afectada la red de agua potable de Concepción.

Con el fin de interiorizar más el desarrollo y resultados del presente modelos, se explicarán brevemente cada una de las etapas consideradas y las métricas relevantes para el análisis.

3.3.1. Water Network Tools for Resilience

Como ya se mencionó en el capítulo 2.2, las redes de agua poseen un status de prioridad en lo que se refiere a su mantención y optimización, siendo siempre necesario el mantener un estado de buen funcionamiento de esta infraestructura. Es en base a estos ideales que se desarrolla el paquete de Python, WNTR, acrónimo para Water Network Tools for Resilience. Network se traduce a redes, siendo la redes el conjunto de tuberías, válvulas, bombas, estanques, reservas

y uniones que forman así un sistema de distribución de agua.

WNTR se basa en Epanet, una herramienta computacional que busca simular el movimiento y destino del agua existente en una red, ayudando a modelarla y a implementar mejoras de ser necesario. Es gracias a esta cercanía entre el módulo WNTR y el programa Epanet que el modelo de WNTR recibe una red que ha sido exportada de Epanet para su análisis.

Las características más relevantes de WNTR son; generar modelos de redes de agua, modificar dichas redes y su operación, hacer que sufra eventos disruptivos y añadir estrategias de reparación/mitigación/respuesta, correr simulaciones probabilísticas (que es importantísimo para el presente trabajo) y generar gráficos para el análisis de los resultados.

La decisión de usar WNTR como la base del modelo, se gesta a raíz de todas las capacidades que posee, mencionadas anteriormente, y por las siguientes en específico:

- Realizar análisis hidráulicos por análisis dependiente de presión (PDA).
- Incluir cambios en redes según indicaciones de curvas de fragilidad.
- Determinar métricas de resiliencia de la red.

Con el fin de no utilizar gran espacio en la explicación del modelo, y con la intención de tentar al lector de visitar la tesis de Abarca [2022], ésta sección se limitará a presentar esquemas de la funcionalidad del modelo (inspirados en la tesis original), con breves explicaciones respectivas. Partiendo con un desglose de los pasos del análisis de red en estado normal presentado en la figura 3.7 y continuando con las etapas del análisis de red cuando se aplican las amenazas asociadas a este estudio, en la figura 3.8.

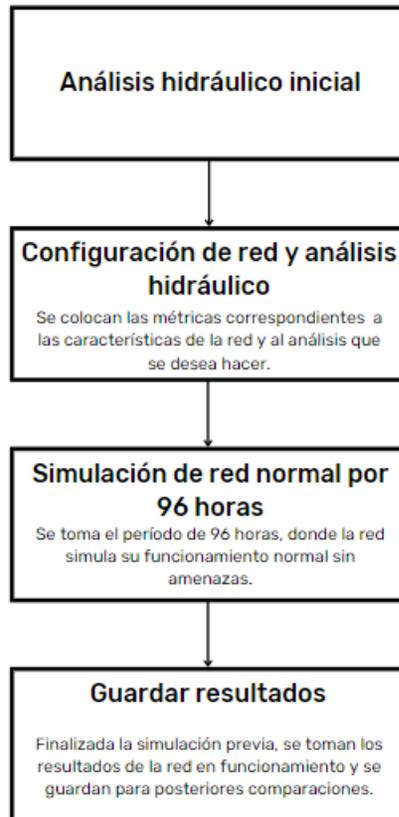


Figura 3.7: Etapas de análisis de red en estado normal.

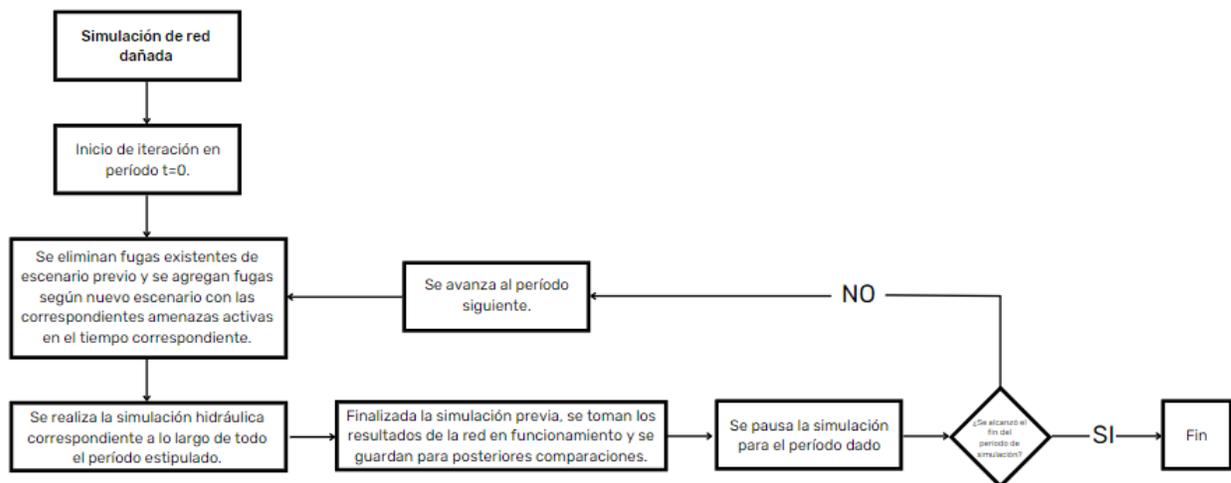


Figura 3.8: Etapas de análisis de red aplicando amenazas.

En resumidas cuentas, la figura 3.7 nos indica que se toma la red en estado base y se hace un análisis respectivo de sus métricas y características, mientras que la 3.8, avanza en el análisis, tomando la red en diferentes escenarios de amenaza, complementando con la temporalidad correspondiente de cada escenario.

Es importantísimo notar que la medida de daño se hace a través de la existencia de fugas en el modelo, WNTR, como ya se ha mencionado, posee la capacidad de modificar las redes en sí, entregando el poder de agregar y quitar fugas según se modele (para escenarios de amenaza sísmica en nuestro caso). Las fugas están diseñadas en WNTR según la demanda $d_{leak}[\frac{m}{s}]$:

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

Donde:

- C_d : Coeficiente de descarga, 0.75 por defecto en WNTR.
- A: Área de fuga [m^2].
- g: Gravedad, 9.81 [$\frac{m}{s^2}$] por defecto en WNTR.
- h: Altura [m], la cuál se calcula internamente por el sistema.

Asociados a la temporalidad y períodos antes mencionados, un análisis competente es más que posible. El solucionador de WNTR provee, usando como base su propia simulación hidráulica, diferentes análisis de gran utilidad al momento de evaluar una red, sobre todo, como es en el presente caso, imponiéndole diferentes escenarios.

Dentro de los cálculos resultantes podemos encontrar lo siguiente:

- Presión por nodo y para cada período.
- Demanda y demanda de fuga.
- Carga hidráulica.
- Velocidad y caudal.

3.4. Métricas de Redes

Con el fin de aterrizar los resultados y realizar un análisis alrededor de ellos, es que se deben establecer métricas. En la sección 2.1.2, se explicó a grandes rasgos como se podía clasificar una métrica para el presente objetivo de estudio, Fernández Fuenzalida [2021] en su trabajo presenta diferentes métricas relevantes para ilustrar el análisis de resultados de una red de agua potable bajo amenazas, Abarca [2022], toma tres de estas métricas y añade una cuarta, siendo esta una métrica económica, cada una será presentada a continuación.

- Water Service Availability (WSA) o disponibilidad de servicio de agua:

Es la razón existente entre la disponibilidad real de la red bajo un escenario específico dado, versus la demanda que tendría la red en un escenario normal. Más específicamente,

el flujo que sale de la red bajo un condicionamiento característico, comparado con el flujo de salida típico. Con esta métrica podemos deducir la capacidad de la red cuando se ve afectada por agentes externos.

- Presión mínima y presión requerida:

Asociado a la presión, tenemos dos métricas que nos interesan, incumplimiento de presión mínima y de presión requerida. Si bien con ambas podemos realizar un análisis de la satisfacción de estándares de desempeño, el incumplimiento de presión mínima mostrará en totalidad el estado funcional de la red tras someter a esta a un escenario de amenaza. El incumplimiento de presión requerida es igual de importante, nos sirve para determinar en que otros lugares la red podría presentar problemas independiente de que el servicio en sí, no falle. Esto es clave porque representa estados de daño para los lugares en donde ocurre el incumplimiento. Para el presente análisis, se considero una presión mínima de 5 [mca] y presión requerida 15 [mca].

- Riesgo económico o multa:

Esta métrica busca representar el valor de pago monetario en el que se podría incurrir (en formato de multa y en UTM) cuando la red falla, dependiendo este de la magnitud de daños, incumplimiento de funcionamiento de la red (incumplimiento de presión requerida) y número de clientes afectados. El límite de la multa está establecido en 1000 UTM. Abarca [2022] desarrolla una ecuación que busca representar ese valor, se basó en un procedimiento de sanción realizado por la SISS el año 2019, así, calcula un valor de multa por nodo, para eventualmente calcular el valor total para la red. Dicha ecuación es la siguiente:

$$Multa_{nodo} = \begin{cases} 1.2863 * \frac{N_{clientesafectados} * 15[mca]}{P_{promedio_{nodo}}} + 6.0255, & \text{si } P_{promedio_{nodo}} < 15[mca] \\ 0, & \text{si } P_{promedio_{nodo}} \geq 15[mca] \end{cases} \quad (3.2)$$

Donde:

$$Multa_{red} = \sum Multa_{nodo} \quad (3.3)$$

3.5. Escenarios de Amenaza

Lo diseñado por Abarca busca predecir el comportamiento de una red frente a amenazas específicas, en base a esto mismo es que modela para tres amenazas, pero en el presente trabajo se consideran dos:

- Sismos.
- Deterioro.

En resumidas cuentas, la caracterización de amenazas funciona de forma muy directa, se modela la amenaza sísmica según el lugar y los valores de parámetros asociados a dicho lugar, recordando también las bases que sentó Garvs para la modelación de su curva de

fragilidad, con sus condiciones explicadas en la sección 2.2.4. Se activa la amenaza sísmica y se obtienen los escenarios, de ser el caso, se asocia con la amenaza de FFE, por otro lado, el deterioro y sus escenarios se modelan y obtienen aparte.

A continuación, se explicará en mayor detalle las amenazas consideradas para el presente trabajo y sus especificidades.

3.5.1. Amenaza Sísmica

Con el fin de caracterizar la presente amenaza, se toma como base lo desarrollado en PSHA, *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, en español, análisis probabilístico de amenaza sísmica. Baker [2013], explica que al momento de determinar los peores escenarios para un evento sísmico, se podría pensar en que tomando el historial de eventos de un lugar y escogiendo en base a la mayor magnitud bastaría para establecer el peor escenario, pero esto es falso, dado que en la consideración de un *worst case scenario* entran más variables y que la problemática del análisis probabilístico erradica en identificar y considerar dichas variables, añadiendo complejidad a ésta área de investigación.

Afortunadamente, es el mismo Baker quien eventualmente propone las métricas que deben ser consideradas para el análisis probabilístico deseado, siendo estas ubicación, magnitud e intensidad de movimiento de los futuros sismos en el lugar deseado. Así, es que se busca con estos datos generar una curva de amenaza, que muestre gráficamente una relación entre la tasa de excedencia anual y la intensidad sísmica de cada escenario, utilizando esto en conjunto con una curva de fragilidad, como las vistas anteriormente, es que se puede estudiar la probabilidad de falla de las tuberías en una red.

Para el presente caso de estudio, Concepción, las métricas necesarias fueron determinadas en base a los datos históricos encontrados en el mapa sísmico interactivo de la USGS. Las condiciones para que los datos fuesen considerados relevantes eran que los sismos hubiesen ocurrido después de 1950, fueran de una magnitud mayor a $6.5 M_w$ y se encontrasen en un radio de 200 km desde el centro de la ciudad. Con todas estas consideraciones, los resultados son los presentados en la tabla 3.2, y lo presentado en la figura 3.9, es un mapa que exhibe muy simplemente la cantidad de sismos considerados para el análisis y las condiciones a las que se atuvo la búsqueda de dichos sismos.

Tabla 3.2: Parámetros históricos de Concepción.

$M_{min}[-]$	$M_{max}[-]$	$R_{min}[km]$	$R_{max}[km]$	$R_{mean}[km]$	$R_{cov}[-]$	$Z_{mean}[km]$
6.5	9.5	27	193	127	0.4848	25

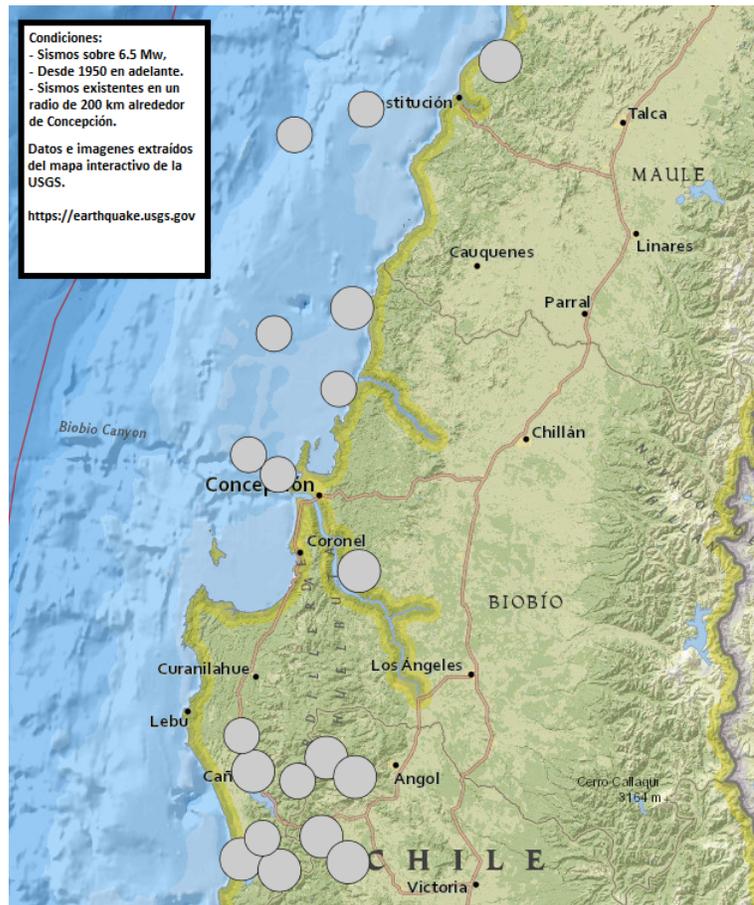


Figura 3.9: Mapa de sismos considerados para extracción de datos.

Poulos et al. [2019] proponen valores para la aplicación de la Ley de Gutenberg-Richter para todas las zonas de Chile. Utilizando sus datos se establecen los siguientes valores de aplicación de G-R: $a=4.76$ y $b=0.77$, asociados a la zona donde se encuentra la ciudad de Concepción.

Utilizando estos datos y análisis de MonteCarlo, es que el modelo plasma la distribución de magnitud de momento (figura 3.10) y distribución de radio de ruptura (figura 3.11). , donde los resultados son los siguientes:

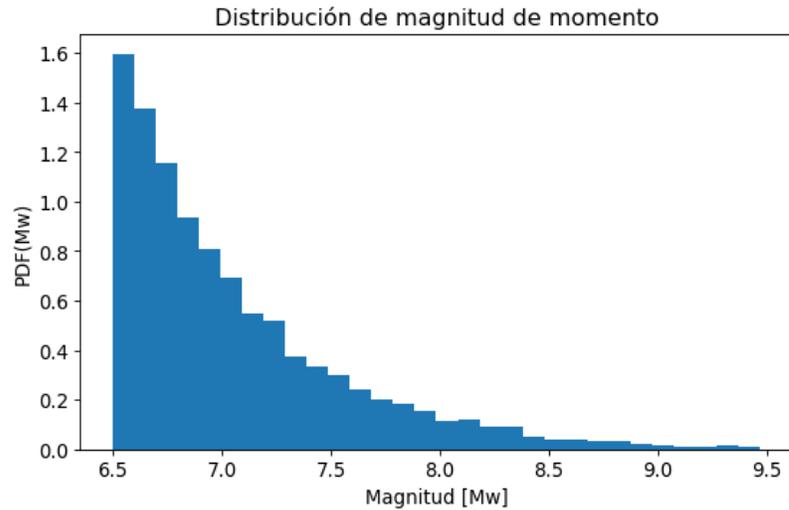


Figura 3.10: Distribución de magnitud de momento para datos de Concepción.

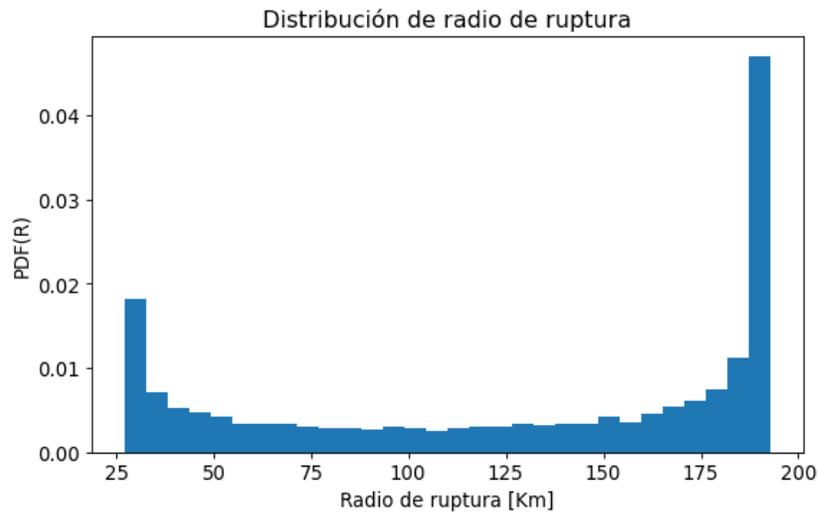


Figura 3.11: Distribución de radio de ruptura hipocentral para datos de Concepción.

Notamos que en el eje de las ordenadas en ambos gráficos aparece PDF, esto hace referencia a una función de densidad de probabilidad. Esta es desarrollada por Baker [2013] siendo un “subproducto” de la ley de G-R.

Es importante mencionar que el código pretende usar dos GMPE, las cuáles son las siguientes:

- Idini et al. [2017].
- Montalva et al. [2017].

Para el desarrollo de la presente memoria, se utilizan los resultados que se obtienen usando la GMPE de Idini como base, esto dado que dichas GMPE fueron diseñadas especialmente para ser aplicada en nuestro país, usando parámetros autóctonos de Chile para su estudio. La utilización de estas ecuaciones existen bajo los criterios de análisis mencionados en la sección 2.2.4, entregando la siguiente distribución de PGA, presentadas en la figura 3.12.

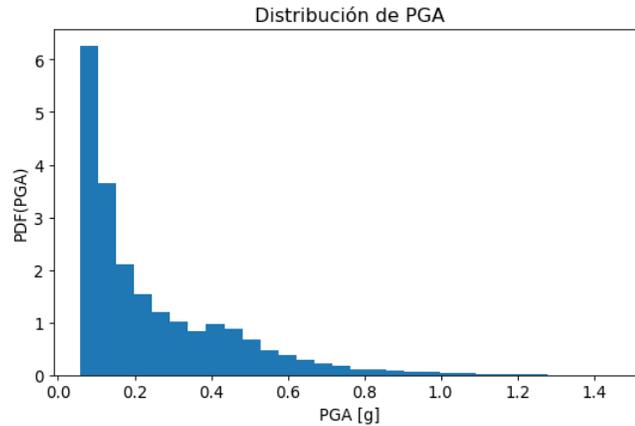


Figura 3.12: Distribución de PGA utilizando GMPE Idini et al. [2017].

3.5.2. Amenaza de Deterioro

Como se mencionó anteriormente, el deterioro de la red es también una amenaza que se considerará en el presente análisis. En este caso, deterioro hace referencia al estado de las tuberías y nodos a través del tiempo, del mismo modo que cualquier otra estructura pudiese verse afectada en su utilidad y funcionamiento. El deterioro puede venir de distintas fuentes, un simple desgaste de material con los años, cambios de presiones importantes, agentes externos tales como modificaciones aledañas a la estructura o modificaciones a la red.

Abarca [2022] caracteriza la amenaza bajo ciertas condiciones, primero, se establecen fallas asociadas a una probabilidad de falla que funciona en base a una tasa de falla, la cual afecta a la red estudiada posicionando todos sus elementos en una condición basal. Dicha condición basal asume que todos los elementos de la red existen hace el mismo tiempo, haciendo caso omiso a las características específicas de cada elemento, tales como diámetro y material. Como se mencionó antes se establecen fallas, estas de la forma de número de fallas por kilómetro, aumentando el valor inicial con el tiempo. La cantidad de fallas por kilómetro son plasmadas desde una tasa de fallas por km, la cual, a través de diferentes ecuaciones explicadas en el modelo de Shamir and Howard [1979], genera el número de fallas esperado en cierto período, desde un tiempo y condición inicial.

Finalmente utilizando un modelo de distribución de probabilidad de Poisson propuesto por Su et al. [1987], es que se obtiene la probabilidad de falla. A modo de resumen y con el fin de plasmar las ecuaciones citadas se presenta el diagrama de flujo de la figura 3.13.



Figura 3.13: Desarrollo del análisis de la amenaza de deterioro.

Usando la red de agua potable de Concepción y los datos asociados a la ciudad se obtiene lo plasmado en las figuras 3.14 y 3.15, que muestran 30 casos según el paso de los años.

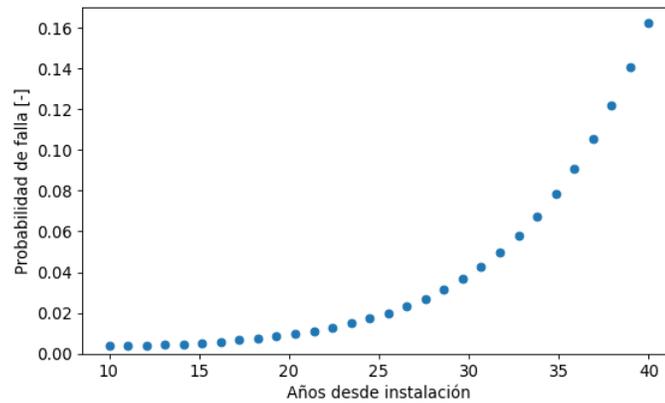


Figura 3.14: Probabilidad de falla promedio (con $t_0 = 5$ y $t_{inicial} = 10$).

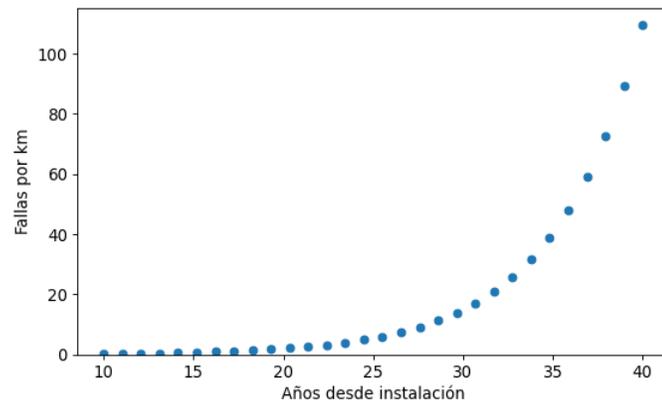


Figura 3.15: Tasa de fallas por kilómetro promedio.

3.6. Red de Agua

Finalmente, era necesario generar la parte central de todo el estudio, la red de agua. Esta es el punto más importante, ya que esta es la infraestructura crítica en la que se centra el

análisis de esta memoria, utilizando el código con todas las métricas y amenazas mencionadas anteriormente.

La red de agua se genera para ser compatible con WNTR, paquete de Python explicado anteriormente. Cualquier red que sea analizada deberá cumplir con el formato correcto asociado, y asimismo, deberá poseer las cualidades características de la red real que intenta emular, con el fin de que los resultados sean lo más fiel posible al trabajo que se intenta realizar.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el caso estudio es Concepción, se tuvo que superar un proceso bastante arduo con el fin de lograr que la red (que inicialmente era un plano CAD), fuera finalmente correcta y compatible para realizar el análisis utilizando el código de Python de Abarca [2022]. Para confirmar que la red poseía un correcto funcionamiento, esta se desarrolló, arregló y mejoró en el programa Epanet (<https://www.epa.gov/water-research/epanet>). En la figura 3.16 se muestra la red en el programa antes mencionado, donde los puntos representan a los nodos y las líneas a las tuberías de la ya mencionada red.



Figura 3.16: Red de agua potable de Concepción, introducida en el programa Epanet.

Capítulo 4

Generación de Red de Agua

El elemento principal para el desarrollo de la presente memoria, es la red de agua potable de Concepción. Ésta será introducida en el modelo de Python con el fin de obtener los resultados, pero, el desarrollo y obtención de esto no es tan simple, considerando que en un inicio se tenía únicamente el plano CAD de la red, obtenido pidiendo el PR012 - Nueva Base de infraestructura (NBI) de la empresa sanitaria ESSBIO (que es la que opera en la ciudad de Concepción) a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SiSS), mientras que el modelo no acepta ese formato.

Partiendo por lo básico, el modelo pide una red en formato *.inp*, dichos archivos son redes extraídas del programa Epanet, un programa que analiza las redes de agua que se le introduzcan o diseñen en el programa mismo. Considera su viabilidad, y analiza parámetros importantes como presión, dirección de flujo, demanda, cabezal hidráulico y calidad. Todo esto tomando elementos típicos de una red, como lo son las tuberías, nodos, estanques, reservas (consideradas también plantas de elevación), bombas y válvulas. Después de tener un modelo que funcione bien, se exporta la red y es dicho archivo exportado el que se introduce en el código que se ha citado durante el desarrollo de este documento. Finalmente, el programa se hace correr y se obtienen los resultados necesarios, con los cuáles se realizará el análisis necesario.

El problema es en grandes rasgos generar la red óptima a raíz de datos poco compatibles como lo fue en esta oportunidad. A continuación, se desglosarán los diferentes errores en los que se incurrió y de que manera se solucionaron. Estos serán presentados en dos secciones, una haciendo referencia a los errores que se tuvieron que corregir para lograr las correctas definiciones de la red y otra, en la que se explique como se solucionaron los problemas que se presentaron debido al mal funcionamiento de la red en los programas (Epanet y modelo Python).

La intención de la siguiente sección es establecer una base de “manual”, para así eventualmente ayudar a establecer un *modus operandi*, para lidiar con la necesidad de transformar una red de formato CAD, a un formato compatible con Epanet.

4.1. Origen y Definiciones de Red

Todos los problemas aquí presentados, son problemas en donde la red no se veía fielmente representada al momento de incorporarla a Epanet, por lo que cualquier análisis que se hubiese querido realizar no habría tenido validez, dados los errores existentes en la red misma, estos, serán explicados a continuación.

4.1.1. Obtener Red en Formato Compatible con Epanet

En un inicio, el único archivo existente que representaba la red de agua y mostraba utilidad, era un mapa en formato CAD, un plano finalmente. A raíz de esto, se investigó sobre diferentes métodos para generar la red. La primera idea que se asoma, es el generar la red a mano, pero considerando los miles de nodos y tuberías existentes, éste fue considerado un último recurso.

Investigando, es cómo se encontró el programa EpaCad, el cual recibe un plano en formato CAD, y lo transforma a formato *.net*, compatible con Epanet. Así fué como se consiguió el método para lograr interpretar y tener la red en un formato compatible con el necesario. De todos modos, EpaCad presentaba aún bastantes inconvenientes que tuvieron que ser solucionados. Dichos problemas eran derechamente dilemas con las características de la red, elevación, diámetros de tuberías, duplicación de nodos y la no existencia de ciertas conexiones.

4.1.2. Elevaciones Incorrectas

El mapa entregado por EpaCad no poseía elevaciones algunas, o sea, la representación de la red posicionaba a todos sus elementos, en una altitud igual a cero. Con el fin de solucionar esto, se tuvo que recurrir a lo siguiente.

Primero, hubo que tomar un mapa en formato CAD donde se exhibieran las curvas de nivel de la zona deseada, en la región del Bío Bío, donde cada curva tuviese como dato su altitud correspondiente. Después, fue necesario importar el mapa con las curvas en el programa QGIS, donde se asociaron las posiciones con sus coordenadas correspondientes, así se asociaron directamente las altitudes, a los lugares de Concepción.

Finalmente, el mapa CAD que tenga la red de agua, debe importarse a Qgis, localizarse donde corresponda. La ubicación se puede asignar colocando las capas en Civil 3D, en su respectivo lugar en Concepción, adoptando estas las coordenadas correctas, es siempre importante designar un código EPSG claro (un código EPSG es un código único que sirve para referenciar objetos geográficos).

La red importada y todos sus elementos deben tomar las altitudes correspondientes, asociadas a su posición con respecto a la capa de curvas de nivel. Para finalmente exportar la red desde Qgis a CAD, y después convertirlo a formato compatible con Epanet.

En la figura 4.1 se presenta un mapa representando las altitudes de la red.

Elevación de Red de Agua Potable de Concepción

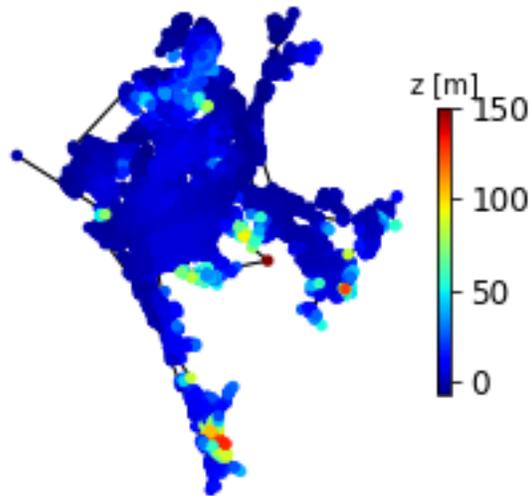


Figura 4.1: Elevaciones de red de agua potable de Concepción para análisis de Epanet.

4.1.3. Diámetros No Asignados

Al mismo tiempo, se notó que faltaba otra característica clave para el funcionamiento de la red, el diámetro de las tuberías que la componen. Usando Epcad se pierden bastantes datos, por lo que aplicar los métodos descritos en estas secciones es una vía rápida para poder solucionar todos los probables problemas que se puedan presentar.

Con el fin de poder añadir los diámetros correspondientes a cada tubería, se establecieron capas en CAD agrupadas por diámetro, y se tomó cada una por sí sola para pasarla a formato *.inp*, donde se exportaron como hojas de cálculo, y se les modificó a todas las tuberías el diámetro correspondiente a la capa.

Luego, se tomaron todas las capas en su formato de hoja de cálculo, y se unieron en una misma hoja, para así poder importarse al Epanet y ser identificada como una única red no dividida por capas.

4.1.4. Diámetros y Elevaciones

Lo realizado en las dos secciones anteriores no es compatible (por decirlo de algún modo), si se lleva a cabo una solución, no se puede hacer el otro y dejar todos los datos de elevaciones y diámetros en conjunto. Es por esto, que con el equipo del proyecto RiPRA se desarrolló

una función en WNTR. Esta toma los elementos de la red con elevaciones, y comparar sus coordenadas con las de los elementos de la red que poseía los diámetros, finalmente incorporando la cualidad de diámetro correspondiente a los elementos de la red (que ya poseían elevación), dicha función es *diametros.py* y se puede encontrar en el Anexo A.

4.2. Funcionalidad de Red en Epanet y Python

La presente sección, hace referencia a los problemas en los que la red no estaba en un correcto estado para presentar resultados, o sea, que en Epanet o en Python, esta entregaba error al momento de llevar a cabo un análisis.

4.2.1. Capas Separadas

Cómo se vió en la sección 4.1.3, con el fin de lograr incluir los correctos diámetros de tuberías, hubo que separar la red en capas, esto resultó en que al momento de colocar la red en Epanet y llevar a cabo el análisis, surgiera un error. Este era que la red no estaba completamente conectada, y esto sucedió dado que al haber separado en algún punto a la red en capas, estas quedaron superpuestas, y no se juntaron en los nodos con coordenadas en común.

A raíz de esto, se notó que las superposiciones solo existían en nodos, o sea, que dos elementos se superponían, sí o sí eran nodos, uno perteneciente a una capa con un diámetro A, y el segundo a otra capa correspondiente a un diámetro B. Se concluyó, y eventualmente confirmó, que los dos nodos superpuestos compartían exactamente las mismas coordenadas, esta situación se repetía miles de veces, por lo que arreglar esto manualmente hubiese sido poco óptimo. Es por esto, que se desarrolla una función de Python llamada *Eliminar_repe.py*, encontrada en el anexo B.

La función *Eliminar_repe.py* (anexo B), recibe el archivo de la red *.inp* transformado a *.txt*, y, un archivo *.txt* en blanco, donde se escribirá la red nueva y arreglada. Lo que hace la función, es encontrar coincidencias en el atributo de ubicación entre dos nodos, y reemplaza el nombre del segundo, dejando un único nodo para todas las definiciones e uniones existentes, así, Epanet sólo encuentra un nodo en la ubicación correspondiente, y todas las uniones respectivas se hacen hacia este.

4.2.2. Nodos Desconectados

Habiendo solucionado lo explicado en 4.2.1, se esperaba que Epanet pudiese hacer un análisis de la red sin problemas, pero se incurrió en un nuevo error, existían nodos sueltos. Estos estaban superpuestos a tuberías, por lo que aparentaban estar conectados, mas no era así.

Para solucionar esto, dado que la cantidad de nodos sueltos no era considerable, simplemente se modificaron a mano las uniones que fallaban. Se encontraron los nodos con problemas gra-

cias a las advertencias que emite Epanet, y se solucionaron las conexiones. Es importantísimo, que si es necesario eliminar una tubería, para colocar un nodo en medio (resultando en dos tuberías), se revise y confirme inmediatamente el diámetro correcto de la tubería insertada, ya que Epanet por defecto coloca que este es de 12 [mm], lo que podría hacer que se incurran en problemas en el futuro.

4.2.3. Presiones Negativas

El último problema que hubo que resolver fue, la existencia de presiones negativas en la red, evidentemente, en un escenario real, no existen presiones negativas, pero estas son una manera que usa Epanet para expresar un error en las definiciones de caudal y flujo, por consiguiente, en presencia de estas, Epanet envía una alerta de error en su análisis, y deben ser solucionadas.

Para solventar esto (y aprovechar de dejar las presiones en al menos el mínimo establecido de 15 [mca]), hubo que encontrar un par de tuberías que tuvieron errores por no cambiar los diámetros en sus modificaciones hechas, descritas en la sección 4.2.2. Luego, hubo que revisar que estuvieran bien definidas las características de los estanques y reservas de la red. Para esto, primero se tomó como guía la información de ESSBIO S.A entregada a Andrés Guzmán, pero con el fin de actualizar dicha información, se pidió el recurso PR00012 a la Superintendencia de Transparencia, y con los datos y mapas que ellos proveyeron, se pudo ajustar de forma correcta la red y por fin, que esta estuviese lista para un correcto análisis en el modelo.

Es importante mencionar que el proceso de arreglo de la red tomó meses, ajustar las correctas definiciones y arreglar los problemas, que cada vez que se presentaban eran reiterativos, fue un proceso largo.

Capítulo 5

Resultados

Con el fin de definir los resultados que se esperan obtener con este trabajo de título, se debe recordar cuál es la motivación inicial para desarrollar este amplio trabajo, durante un extenso período de tiempo. Se planteó desarrollar este tema, debido a que el estudiante se entusiasmó con la propuesta de formar parte de un equipo que trabaja en un proyecto que busca innovar, y principalmente, optimizar el funcionamiento, diseño y mantención de redes de agua, con el fin último de hacer mejor resguardo y uso del agua potable, vital recurso que en los últimos años se ha visto en escasez en ciertas zonas de Chile, principalmente el norte.

Los resultados se presentarán de forma organizada, mostrando los escenarios sísmicos asociados a cada amenaza y los gráficos resultantes de las métricas relevantes explicadas en la sección 3.4.

A modo de primer acercamiento, es importante mostrar la curva de fragilidad asociada al nivel de daño (figura 5.1), para el análisis de los presentes resultados.

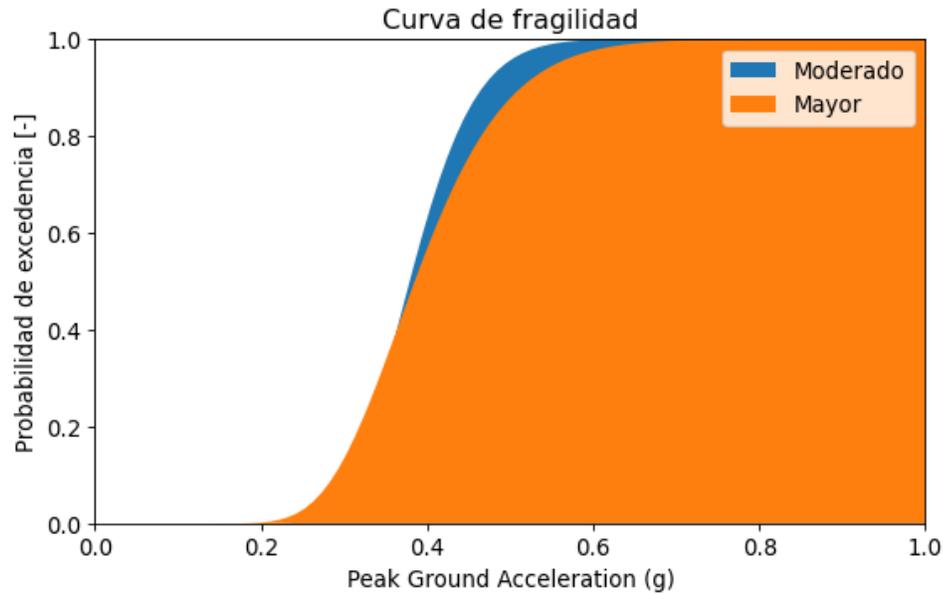


Figura 5.1: Curva de fragilidad usada para estudio de rotura de tuberías de red de agua potable de Concepción.

5.1. Amenaza Sísmica

En esta sección, se mostrará la red afectada únicamente por la amenaza sísmica, en la sección 5.2 se mostrará la red afectada tanto por el deterioro en sí, como una mezcla de ambas amenazas. Para la presente muestra, se hizo un sampleo de 20 escenarios sísmicos, mientras que en la siguiente sólo serán 10 a lo largo de 30 años, tomando 5 años diferentes como referencia, resultando en 50 escenarios. Esta decisión se tomó en base a la optimización de tiempo de compilación, donde tomar los mismos 20 escenarios sísmicos hubiese resultado en una cantidad de tiempo enorme para llegar a los resultados, dadas las capacidades del principal computador en uso.

Por esto último, si bien las curvas de amenaza serán las mismas en ambos análisis de amenazas (sísmica y de deterioro), el número de puntos de muestreo de escenarios sísmicos, serán diferentes.

Dicho lo anterior, se procede a presentar la curva de amenaza con los escenarios sísmicos asociados en la figura 5.2.

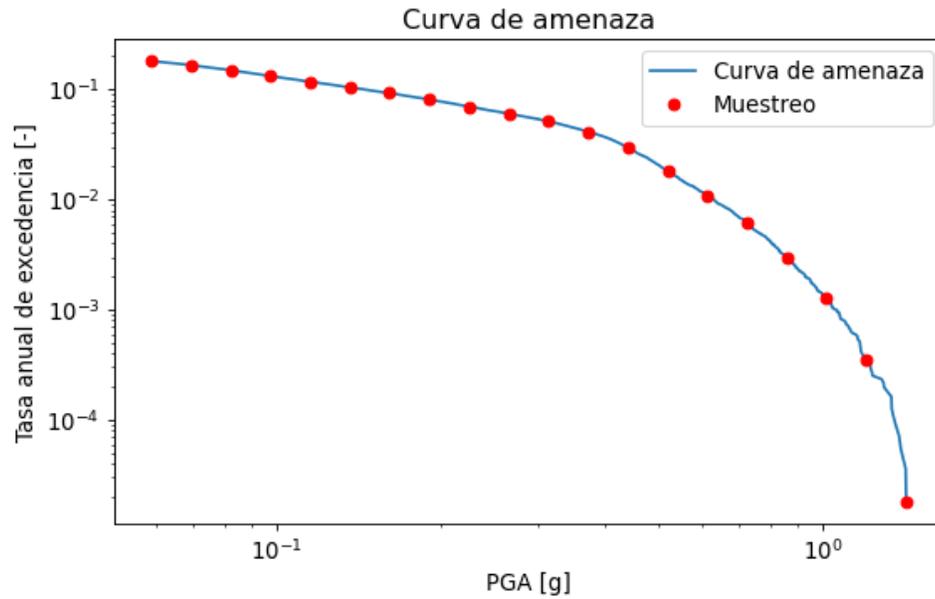
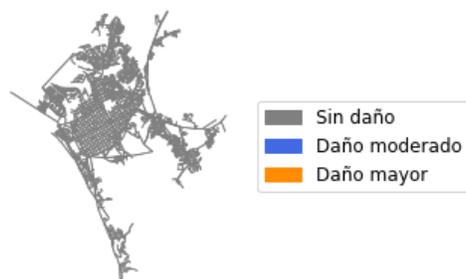


Figura 5.2: Curva de amenaza con 20 escenarios sísmicos.

En la figura 5.2, cada punto representa uno de los escenarios sísmicos mostrados a continuación (en orden 1, 2, 3, 4...,18, 19, 20 de izquierda a derecha). Como se observa, en el eje de las abscisas se muestra el PGA (sección 3.1) asociado a cada escenario sísmico, y la tasa anual de excedencia que mostraría cada escenario según su intensidad, siendo esta, el número de veces, por unidad de tiempo (un año en nuestro caso), en que el valor de esa intensidad sísmica es excedido.

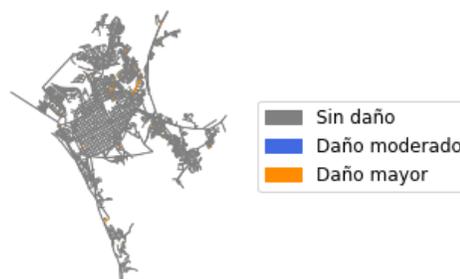
A continuación, en la figura 5.3, se presentan todos los escenarios sísmicos relevantes, inicial, final y en los que se notan cambios, exhibiendo cómo afectan a la red en términos de daño moderado y mayor.

Red dañada, escenario sísmico n°1



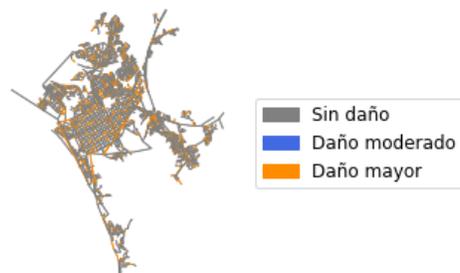
a Escenario n°1.

Red dañada, escenario sísmico n°9



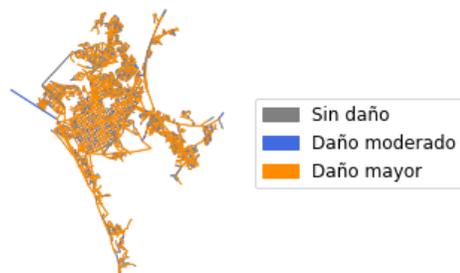
b Escenario n°9.

Red dañada, escenario sísmico n°11



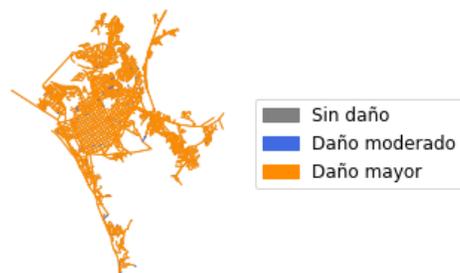
c Escenario n°11.

Red dañada, escenario sísmico n°13



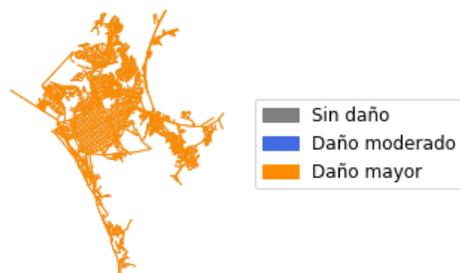
d Escenario n°13.

Red dañada, escenario sísmico n°15



e Escenario n°15.

Red dañada, escenario sísmico n°20



f Escenario n°20.

Figura 5.3: Escenarios sísmicos de daño relevantes.

Los escenarios seleccionados anteriormente, son los que muestran cambios relevantes en el daño, y los que se exhibirán para los análisis de esta sección. La totalidad de escenarios se encuentran en la figura .1, en el Anexo C.

En la figura 5.4, se presentan los daños en los escenarios seleccionados, según el área de fuga [m^2] que existe en cada punto.

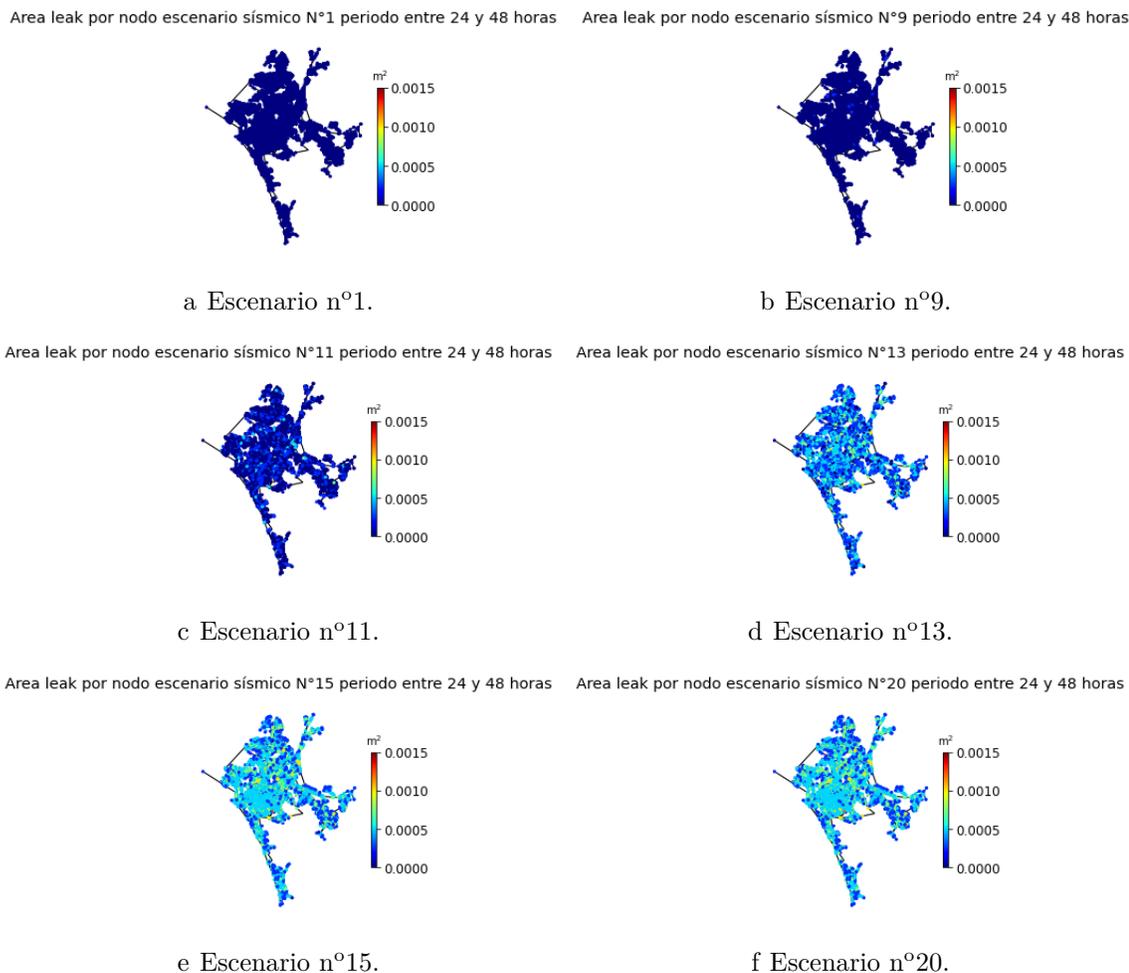


Figura 5.4: Escenarios sísmicos de fuga relevantes.

5.2. Amenaza Deterioro

Para la amenaza de deterioro, se tomó la red y se estableció que esta existe en un año hipotético “5”, eventualmente todo análisis y mención de año n°x es en referencia a una red, que como ya mencionamos, se toma como en un mismo estado de basal de fallo desde el año 5. Dicho estado basal, considera que existen en el inicio del período, 0.1 fallas por kilómetro y considera un factor de aceleración de 0.2 [g].

A continuación, se presenta la sección con los datos asociados a los daños resultantes por el deterioro de la red. La curva de amenaza presentada difiere de la exhibida en 5.2 por lo explicado en la sección 5.1, teniendo así, 10 escenarios en vez de 20. Se representan diez escenarios sísmicos de muestreo en la figura 5.5.

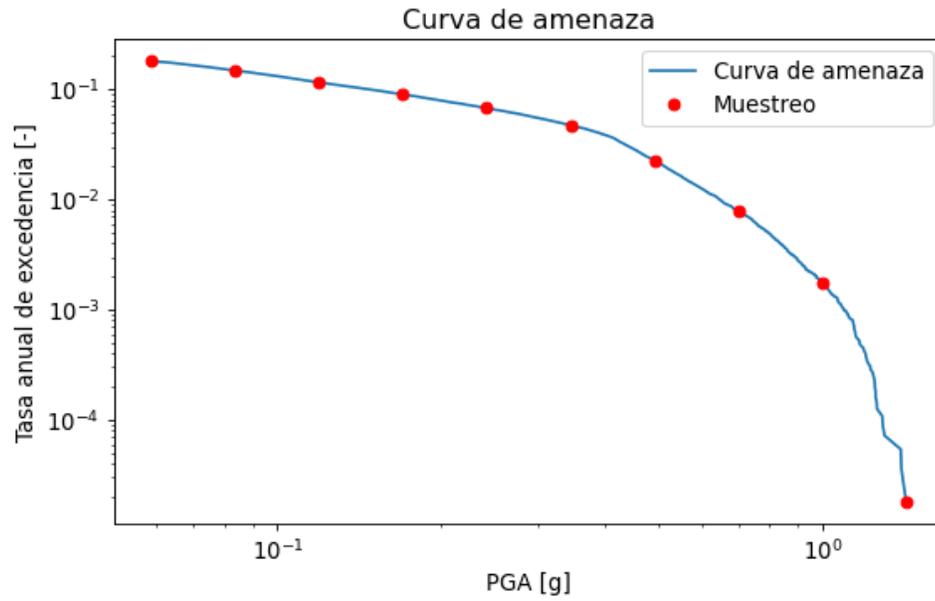
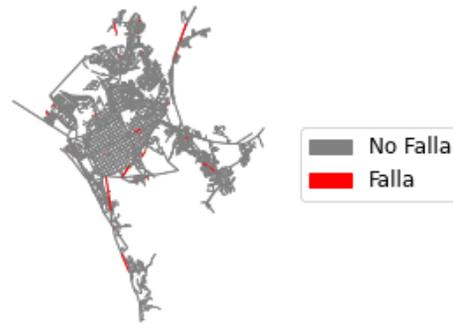


Figura 5.5: Curva de amenaza con escenarios sísmicos.

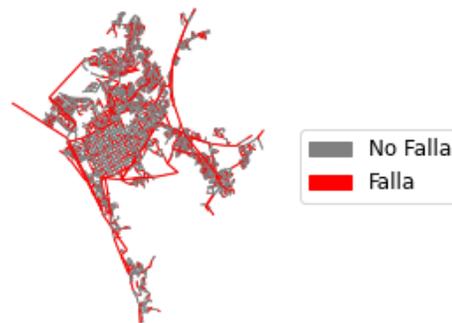
La red que sólo ha sido afectada por el deterioro, tiene una evolución de daño de la siguiente manera (figura 5.6).

Tuberías que fallan por deterioro, año deterioro 10.0



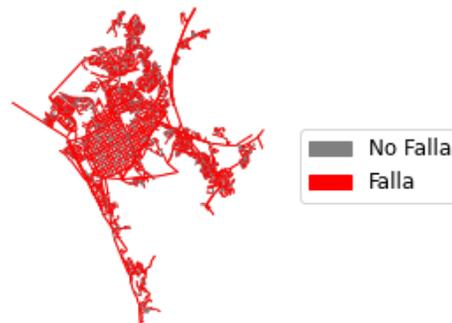
a Escenario de deterioro en año n°10.

Tuberías que fallan por deterioro, año deterioro 40.0



b Escenario de deterioro en año n°40.

Tuberías que fallan por deterioro, año deterioro 50.0



c Escenario de deterioro en año n°50.

Figura 5.6: Escenarios de deterioro.

5.3. Métricas Relevantes

A continuación, se presentan los resultados asociados a las métricas de análisis descritas en la sección 3.4.

5.3.1. WSA

Como ya se mencionó en la sección 3.4, la WSA, o disponibilidad de servicio de agua, plasma el acceso a agua potable por parte de la población, afectada por los diferentes escenarios sísmicos. Evidentemente, una red de agua mientras más daños tenga, menos capacidad de entregar el servicio posee.

La figura 5.7, muestra el porcentaje de la red que llega a estar inutilizable al momento de ocurrir un evento telúrico, según la intensidad del escenario sísmico en sí. En esta figura, coexisten diferentes curvas, estas, como bien se puede distinguir en la parte inferior, muestran como los mismos escenarios sísmicos afectan la misma red, dados diferentes años de antigüedad. Cabe notar que para esta métrica, el deterioro parece no afectar mucho para los diferentes casos.

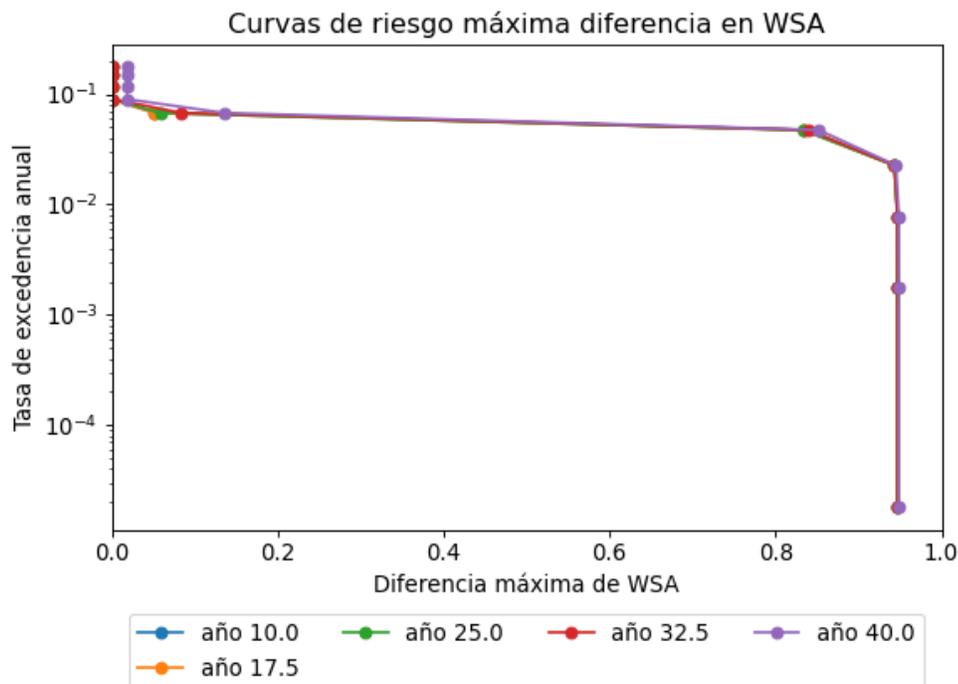


Figura 5.7: Máxima diferencia de disponibilidad de servicio, para distintos escenarios sísmicos, en diferentes años de deterioro.

Por otro lado, las figuras 5.8 y 5.9, muestran la disponibilidad de agua al momento de ocurrencia de los diferentes eventos sísmicos, en diferentes años. La figura 5.8, presenta 6 casos relevantes (de un total de 20) de únicamente la amenaza sísmica, mientras que para

la figura 5.9, se decidió utilizar los casos extremos (año 10 y año 40) de los resultados de la amenaza sísmica, más la amenaza de deterioro, esto dado que la tendencia de que el deterioro no afecta significativamente en esta métrica, se mantiene.

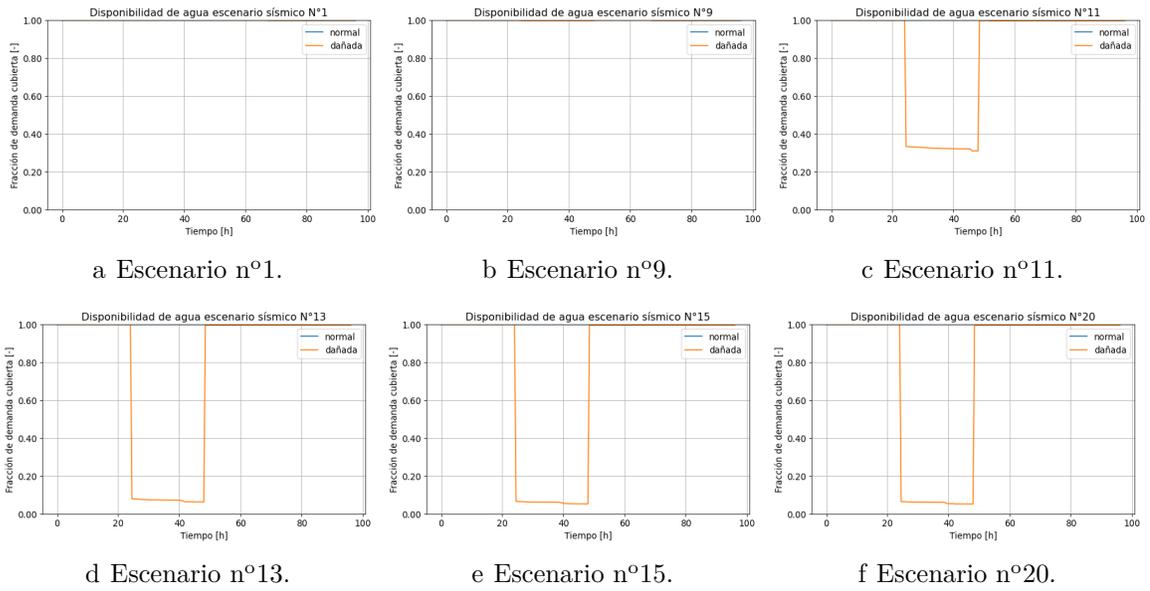


Figura 5.8: Disponibilidad de agua considerando amenaza sísmica.

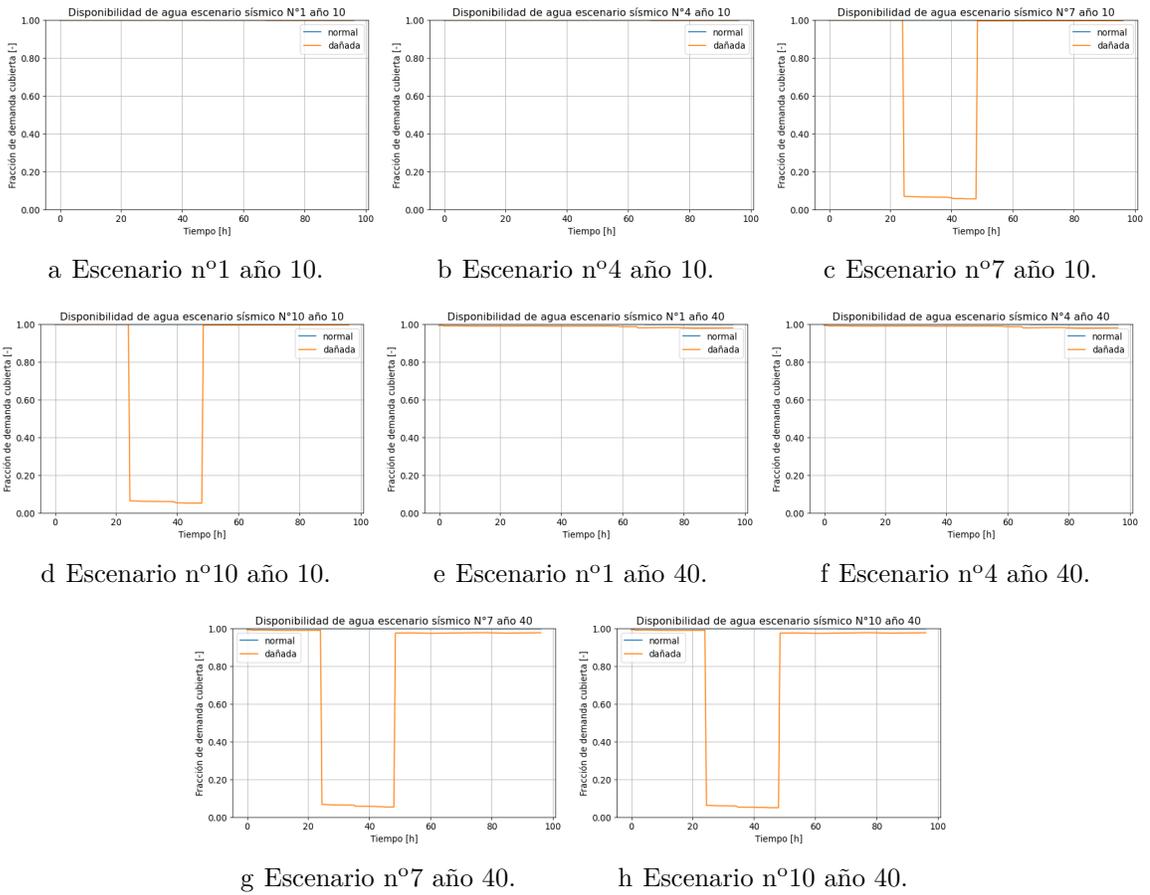


Figura 5.9: Disponibilidad de agua considerando escenario sísmico y año de deterioro.

A continuación, se presentan las curvas de riesgo asociadas a la diferencia máxima y promedio de WSA (figuras 5.10 y 5.11 respectivamente), viendo su variación según el paso de los años desde la instalación de la red.

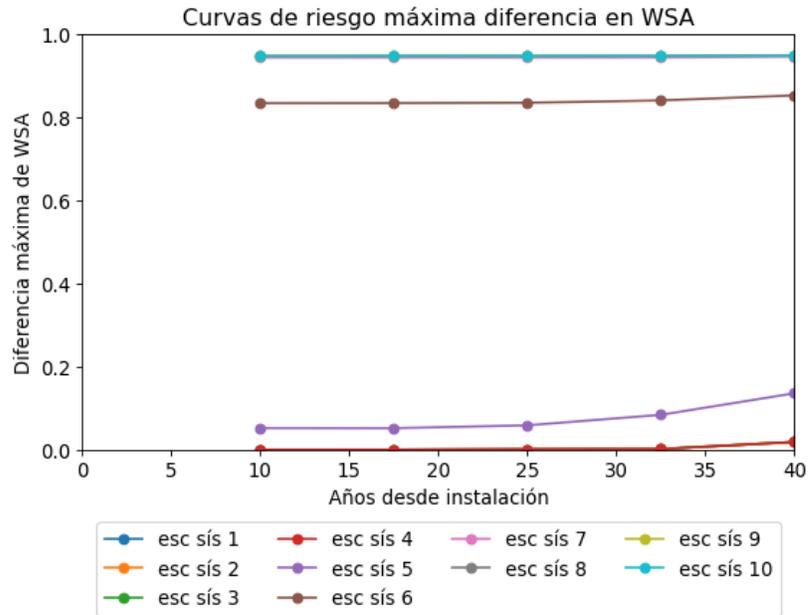


Figura 5.10: Curva de riesgo de máxima diferencia de WSA.

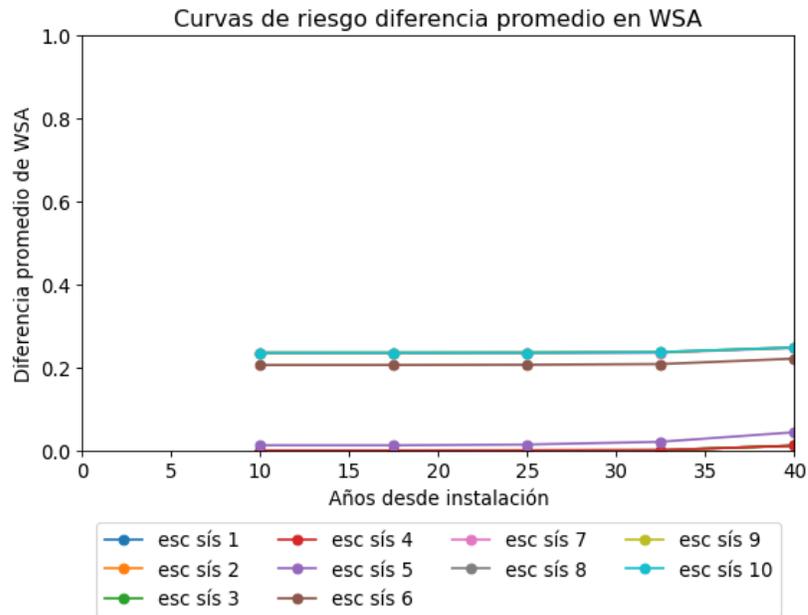


Figura 5.11: Curva de riesgo de diferencia promedio de WSA.

Está demás mencionar que, nuevamente se muestra que la amenaza de deterioro no afecta (o probablemente afecta muy poco) en la disponibilidad de agua, cuando convive con una amenaza sísmica.

5.3.2. Incumplimiento de Presión Requerida

A continuación, se presentan dos gráficos importantes, primero, la figura 5.12, que muestra la máxima diferencia probable en incumplimiento de presión requerida (15[mca]), y la figura 5.13, que exhibe la diferencia promedio probable en incumplimiento de presión requerida.

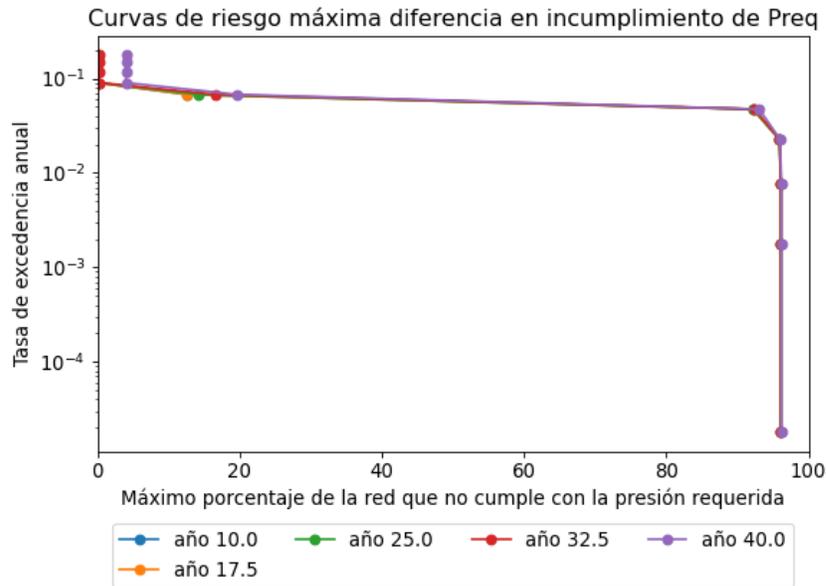


Figura 5.12: Curva de riesgo de máxima diferencia en incumplimiento de presión requerida.

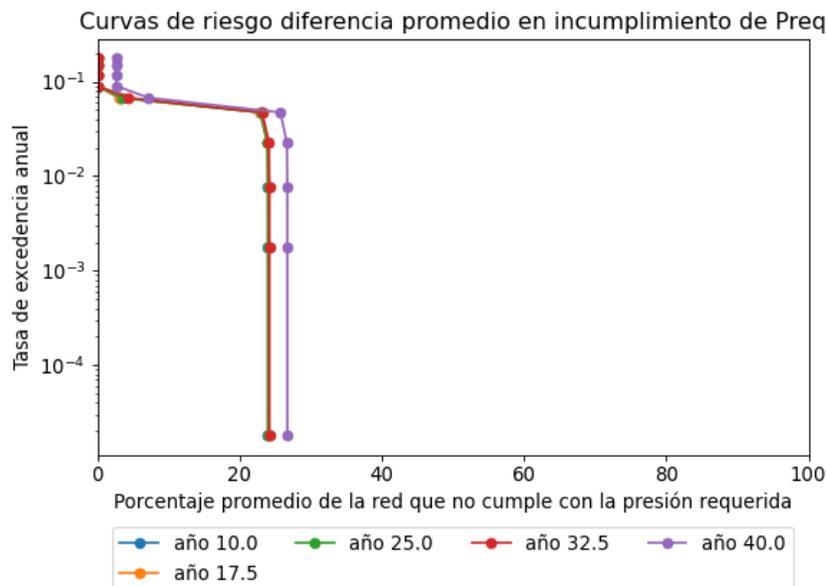


Figura 5.13: Curva de riesgo de diferencia promedio en incumplimiento de presión requerida.

Notamos que, cuando se habla de máxima diferencia de incumplimiento, se está mostrando el máximo de la red que no cumple con entregar el servicio, en un determinado momento durante el efecto de la amenaza sísmica para cada escenario planteado, y que cuando se trata de diferencia promedio, es este mismo concepto, plasmado según el porcentaje de incumplimiento en cada momento del efecto del sismo. En ambos casos se presenta un salto tremendo entre el escenario n°15 y el n° 16, asimismo, un tope de incumplimiento presentado desde el caso n° 17. También es observable que el deterioro no afecta en la máxima diferencia, pero sí en la diferencia promedio.

5.3.3. Incumplimiento de Presión Mínima

La figura 5.14, ilustra la cantidad de nodos que no cumplen con la presión mínima (5 [mca]) según los diferentes escenarios sísmicos a los que se ven sometidos.

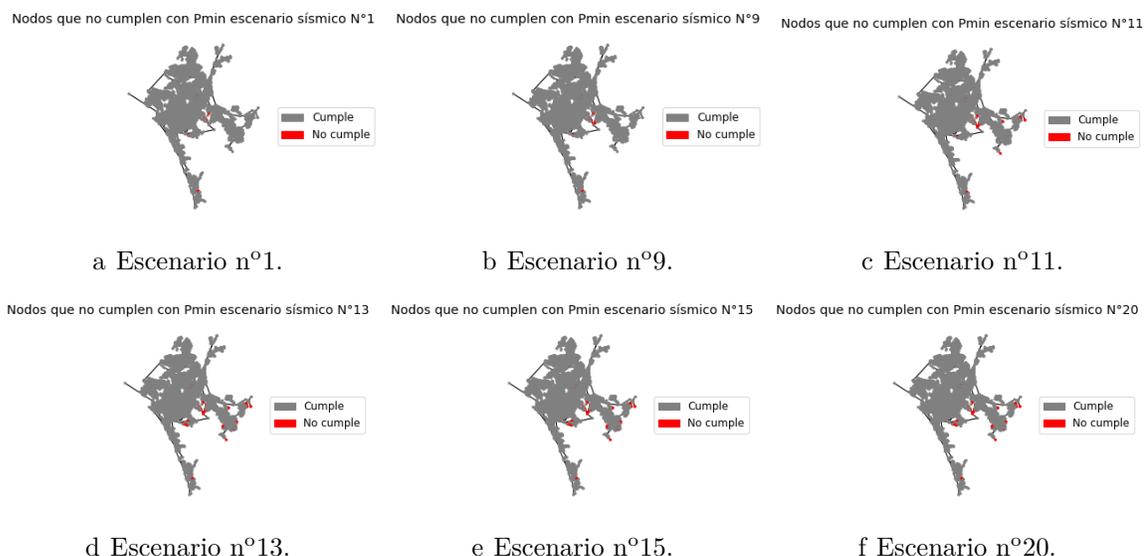


Figura 5.14: Escenarios de incumplimiento de presión mínima relevantes.

Hay que notar que existen nodos que no cumplen con la presión mínima en el escenario sísmico 1, lo cuál resulta extrañísimo, por esto se estudiará en la sección de análisis porque es que este fenómeno podría estar ocurriendo.

A continuación, se presentan dos gráficos importantes, primero la figura 5.15, que muestra la máxima diferencia probable en incumplimiento de presión mínima (5[mca]) y la figura 5.16 que presenta la diferencia promedio probable, en incumplimiento de presión mínima.

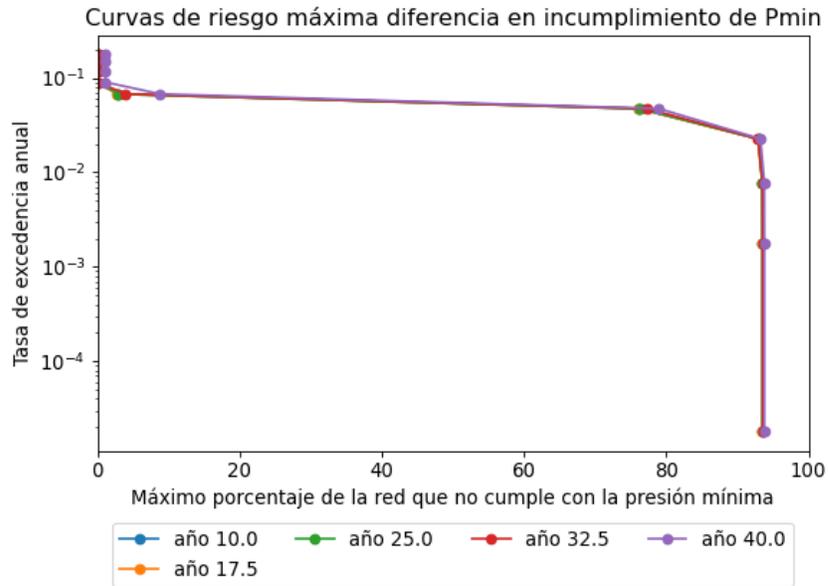


Figura 5.15: Curva de riesgo de máxima diferencia en incumplimiento de presión mínima.

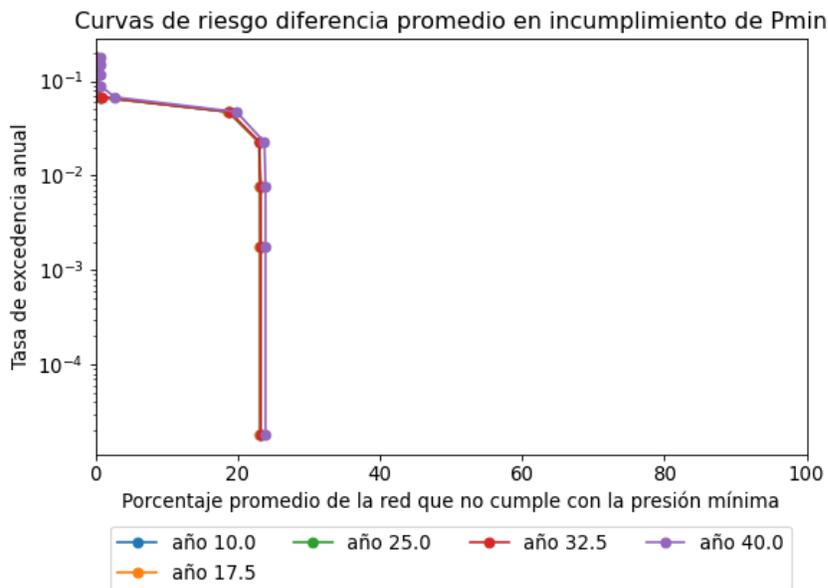


Figura 5.16: Curva de riesgo de diferencia promedio en incumplimiento de presión mínima.

En ambos gráficos notamos, que el efecto de la amenaza de deterioro tiene ínfimo o nulo efecto en el resultado de porcentaje de red que falla. Igual que en la sección anterior, se mantiene la tendencia de un aumento significativo de porcentaje de falla entre los escenarios n°15 y n° 16, mientras que el tope de porcentaje de falla, se encuentra en el escenario n°17 (a modo de aclaración, el punto final en cada curva de las figuras 5.15 y 5.16 representa el escenario sísmico n°20, haciendo cuenta atrás se rescatan los escenarios n°19, n°18, etc).

Capítulo 6

Análisis y Conclusiones

La siguiente sección pretende, a través de diferentes datos, apuntar a lo siguiente:

- Análisis de mapas de amenaza.
- Análisis de curvas de fragilidad.
- Conclusiones correspondientes.
- Aplicaciones futuras.
- Mejoras.

6.1. Daños Asociados al 27F

En la figura 2.3, notamos donde ocurrieron las fallas en la red, al momento de ocurrir el terremoto del 27F, que como sabemos, fue de una magnitud de momento de $M_w = 8.8$. También, en la sección 3.1, se mencionó la importancia del PGA como parámetro de medición en los eventos telúricos, y de como con esta, se han especulado y realizado diferentes curvas de fragilidad, agrupando las que nos interesan en la sección 3.2. Con el fin de realizar un análisis pertinente de la situación de daño y su asociación con las curvas, se presenta la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Daños por kilómetro de tubería asociado a valor de PGA.

PGA	Nº daños	Longitud [km]	Daños/km
0.38	5	20.76	0.24
0.4	40	126.53	0.32
0.42	62	178.48	0.35
0.44	15	89.09	0.17
0.46	39	81.48	0.48
0.48	2	42.30	0.05

Podemos observar, como primer medio de comparación, la curva generada por Yoon (figura 3.4), que asociado a los datos obtenidos, podemos notar que para alcanzar el estado de daño mayor, se atribuyen, para valores de PGA entre 0.38 [g] y 0.48 [g] (los de la tabla 6.1), valores de probabilidad de falla, considerando incertidumbre, desde aproximadamente un 17 % a un 20 %, mientras que para daño moderado, la probabilidad va desde aproximadamente un 35 % a un 48 %.

Observando los valores presentados en la tabla 6.1, vemos que todos los valores cumplen con la curva sólo para el estado de daño moderado (a excepción de la zona asociada con un PGA igual a 0.44 [g], la cuál también cumple con lo esperado para daños mayores). Esto logra tener sentido, cuando se recuerda que el análisis de Yoon et al. [2019], de origen sur-coreano, toma como base de su estudio tuberías de acero. Por esto es interesante notar que, la curva planteada por Garvs (3.3), se ajusta a parámetros no sólo de tuberías de asbesto-cemento (más comunes en nuestro país y en redes de agua potable), sino que a parámetros geotécnicos chilenos, y que la probabilidad de falla aumenta significativamente, lo que hace sentido, ya que los daños ocurridos en el sismo son considerados de tipo daño mayor, ya que la mayoría resultaron en un corte total del servicio. Es por esto que Abarca [2022], tuvo que tomar el trabajo de Garvs como base, para así, generar un modelo más adecuado para un correcto análisis del efecto de una amenaza sísmica en una red ubicada en Chile.

En la figura 3.5, se detalla un estado de daño menor, y es por esto que el espacio diferente al de estado de daño mayor, es tan amplio en comparación a las otras curvas de fragilidad. Asociando los datos de dicha curva con los presentados en la tabla 6.1, notamos que si bien, tiene más sentido comparar los porcentajes de falla por kilómetro, con la probabilidad de falla, aún no es tan representativo como lo desarrollado por Garvs, y nuevamente, en este caso, esto es, porque, como se explicó, ALAM se basa en datos empíricos de sucesos ocurridos en Estados Unidos, considerando los materiales y procesos de unión del país norteamericano, siempre asociándolo, a la época correspondiente del sismo.

Ya dejando de lado las curvas de fragilidad, es interesante correlacionar las fallas del sismo presentadas en la figura 2.3, con el mapa de licuación presentado en la figura 2.4. A este mismo análisis, podemos sumarle la zonificación crítica (figura 6.1) realizada por Guzmán, en su estudio preliminar de roturas de tuberías de agua potable [Guzmán et al., 2012].

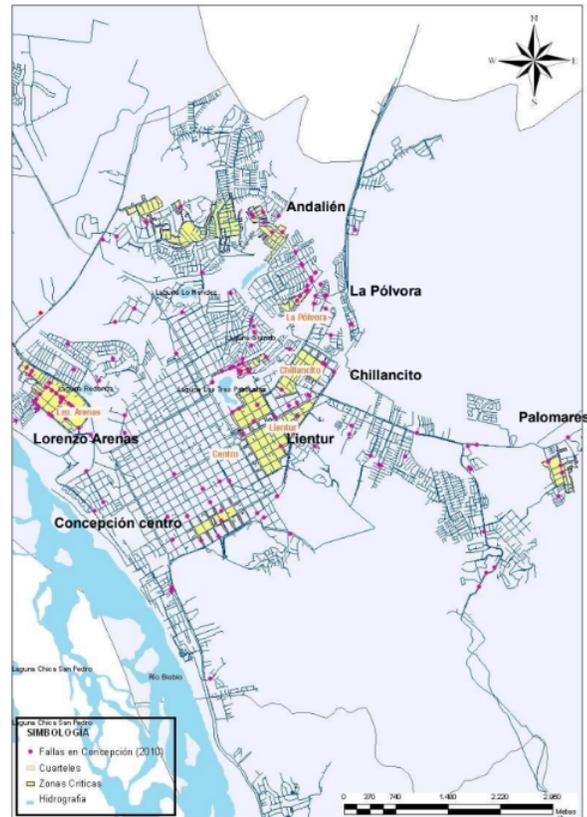


Figura 6.1: Zonas críticas en Concepción (Guzmán et al. [2012]).

Con zonas críticas, Guzmán et al. [2012] intenta plasmar los lugares de la ciudad que más concentran fallas en tuberías. Tomando estos tres mapas en cuenta, notamos que la licuación pareciera tomar el rol más importante al momento de establecer las causas de falla en la red. En todos los lugares, sobre todo de Concepción centro, donde este fenómeno es medio o alto, existen fallas, o, se muestran en la figura 6.1 como zonas críticas. Es importante estudiar la relevancia de esta asociación, dado que el tomar medidas más efectivas de mitigación de este efecto, puede resultar en una disminución de fallas y un mejoramiento del servicio. Podrían establecerse medidas de mitigación más típicas como la compactación dinámica y mejoramiento por vibración, atacando directamente los lugares donde la licuación tiene un riesgo alto. Evidentemente, esto es difícil, ya que sólo sería de fácil aplicación en lugares donde se estuviese planeando una expansión de red, o sea, que el tratamiento de suelos no fuese intrusivo con una red existente, dado que se puede incurrir en una generación de fallas no deseadas. Entonces, sería interesante estudiar el método menos invasivo para realizar un mejoramiento de suelos al momento de tener que interceptar una red, por la existencia de una falla.

6.2. Estados de Daño

Los resultados entregados según escenarios de daño, mostrados en la figura 5.3, nos enseñan que el estado de daño moderado, se supera rápidamente entre escenarios, si bien, esto es directamente deducible notando la curva de fragilidad presentada para el análisis de la red (figura 5.1), es interesante ver que en la práctica, salir de un estado sin daño y entrar en uno de daño mayor, es un paso bastante breve. No obstante, existen nodos que presentan daños moderados, y se puede notar que la concentración de estas ocurre en el centro de la red, que se asocia al centro mismo de la ciudad, donde podríamos decir que disminuye el factor de densidad de tuberías, dada la organización de la red. Es probablemente por esto, que esa sección de nodos demora más en entrar a un estado de daño mayor.

Se observa también, que los primeros daños de consideración mayor, aparecen en lo que serían tuberías de mayor longitud, esto tiene sentido comprendiendo que el hecho de que posean una mayor longitud, la hace más propensa a sufrir roturas por falla de suelo, deslizamiento de este o licuación, dado que abarca más zonas que podrían responder de forma diferente frente a una amenaza sísmica. Observando la figura 5.6, la cuál detalla la falla por deterioro temporal, notamos que son las mismas tuberías de mayor metraje las que sufren fallas. Si bien, se esperaría que el gran factor en términos de deterioro fuera el material del que está hecho una tubería (gracias a la acción de corrosión que aumenta con el tiempo), el modelo no contempla variabilidad en ese aspecto, por lo que se podrían considerar, como aspectos de empuje a la falla, los mismos asociados a la amenaza sísmica. Algo importantísimo de notar en la figura 5.6, es el hecho de que para el escenario de deterioro en el año n°50 casi la totalidad de la red falla, lo que habla de que entre la cuarta y la quinta década, debe empezar a realizarse con urgencia una renovación y mantención de la red, evitando así fallas muy probables.

Evidentemente, si se observa la red dañada por la amenaza sísmica, notamos que no son únicamente tuberías de gran longitud las más propensas a sufrir daño, eso hace que la pregunta de cuál otro factor pueda estar en juego sea relevante. Asociando los mapas obtenidos, en conjunto con la composición de la red, se puede establecer una correlación con la existencia de reservas de agua y la falla de nodos aledaños, atribuyéndose así, a una falla directa en la presión de funcionamiento del sistema o red.

Se asume que en un escenario como el n° 17 (representado en la curva de amenaza 5.2) , toda la red podría presentar un daño mayor. Como se ve , dicho escenario corresponde a una medida de PGA de aproximadamente 0.8 [g]. Esto, dadas las condiciones de Concepción en específico, correspondería a un evento sísmico catastrófico, considerando que en la ciudad en sí, el mayor valor de PGA presentado por el 27F fue de 0.5 [g], y no hay que olvidar que la magnitud del evento telúrico fue de 8.8 M_w .

Se ve que para el área de fugas, la red responde de misma forma que con los daños, explicando la clara correlación entre ambos. Algo que si logra ser interesante notar, es que en ningún punto el área de fuga llega a aproximarse al valor más alto establecido de 0.0015 [m^2], esto puede deberse a que una fuga menor a ese valor, ya resulta ser suficiente para que el flujo de pérdida de agua no incite más rotura en la tubería misma.

6.3. Métricas

Lo primero que se puede decir de las métricas expuestas en la sección 5.3, es que el efecto de la amenaza de deterioro pareciera no afectar en gran medida ni la disponibilidad de servicio, ni el incumplimiento de presiones (mínima y requerida), y la verdad eso se cumple, excepto, para el caso de la presión requerida, donde se puede notar que en el año 40, existe una gran diferencia de porcentaje de la red que no cumple en relación a todos los otros casos. Esto debe ser, porque entre el año 32 y el 40, se alcanza un umbral de fallas por kilómetro, que afecta en justa medida el funcionamiento de la red, para que no necesariamente incumpla con la presión mínima, pero sí que incumpla con la presión requerida.

Como ya se mencionó, anteriormente, comparando las figuras 5.8 y 5.9, y considerando la 5.7, el deterioro no tiene gran incidencia en la disminución de disponibilidad de servicio.

Dentro de los resultados más interesantes de las métricas, está lo representado en la figura 5.14, donde existen nodos que no cumplen con la presión mínima para el escenario sísmico n°1. Esto es evidentemente un error que nos presenta el programa, por lo que entender el por qué se produce es importantísimo. Considerando todos los análisis, configuraciones e iteraciones que se le han hecho a la red, es de gran relevancia considerar su gran magnitud como un obstructor en lo que a veces puede ser un análisis de métricas normal. La conclusión a la que se llega con respecto a este problema, es que la falla en esos nodos, justo aparece contigua a reservorios y estanques, por lo que el efecto de bombas, y más específicamente, la curva de carga de estas no está considerada, y puede que sea relevante en el funcionamiento común de la red. Por esto, puede suceder que la existencia de los elementos de la red, sin una apropiada consideración de, como se cree en este caso, una curva de carga de bomba, puede resultar en el mapa de amenaza presentando un problema improbable.

6.4. Correlación Modelo y Datos Reales

Tomando como base la curva presentada en la figura 5.2, y tomando los datos de PGA presentados en la tabla 3.1, podemos establecer, que los escenarios sísmicos n°11 (5.3.c), y n°13 (5.3.d), pueden asociarse, en términos de PGA, al escenario de amenaza sísmica que se gestó como resultado del 27F.

Notamos que en sí, el paso del escenario n°11 al n°13, presenta un punto de inflexión en lo que respecta el estado de daños. El escenario n°11 muestra un pequeño porcentaje de red con daños mayores, mientras que el 13, ya presenta una totalidad de la red afectada, en su mayoría por daños de carácter mayor. Notando lo presentado en la tabla 6.1, hace sentido correlacionar el aumento de PGA, con el aumento constante y notable de fallas por kilómetro entre los valores de PGA (con las excepciones de PGA 0.44 y 0.48), de la misma forma que los escenarios anteriormente mencionados, presentan un incremento notable de daños justo en estos valores. Como se mencionó, para los sectores asociados a valores de PGA de 0.44 y 0.48 existe una disminución importante en fallas por km, estropeando la expectativa de comportamiento que se especulaba. Se puede observar, comparando las figuras 3.2, 2.2, 2.1 y

2.4, con los lugares donde ocurrieron fallas, que no existe una correlación clara para explicar este fenómeno, por lo que es importante encontrar una explicación no asociada al entorno y a las características de las tuberías. Esta puede ser que gracias la gran cantidad de fallas existentes en otras zonas aledañas, las tuberías encontradas en los sectores de PGA 0.44 y 0.48, pudieron mitigar daños y no fallar.

Como parte de este análisis, es importante incluir que la predicción de fallas en términos de ubicación, no es exacta, aun así, el factor más importante a incluir, es el tipo de suelo asociado a todas las zonas en donde se encuentra la red, así como el riesgo de licuación. Modelar esto presenta una complicación dada la especificidad de cada caso, pero logra ser un factor relevante a incluir en un siguiente análisis. Lo que sí logra predecir con buena precisión, es la intensidad en la cual se presentan fallas (sin daño, daño moderado o daño mayor), y el porcentaje aproximado de la red, o el servicio, que fallará. Esto es de máxima relevancia, dado que el poder establecer como se comportará la red ante cierta magnitud de sismo, es una buena métrica para comenzar a tomar decisiones en cuanto se obtenga información sobre los sectores de fallas, en esta situación hipotética.

6.5. Conclusión

El presente estudio se abordó de tal forma que se pudiesen encontrar diferentes respuestas de la red de agua potable de Concepción frente a los respectivos escenarios de amenaza sísmica que se le imponían, ocurriendo todos estos en un mismo margen de tiempo. El modelo presenta buenos resultados, estos sirven para comprender el comportamiento de la red y cuál será la magnitud de falla de esta para cuando ocurra un evento de determinada magnitud.

Ya establecido el hecho de que se obtuvieron buenos resultados, es relevante considerar ciertas desventajas que presenta el modelo, primero, la base de no poseer diversidad en lo que respecta a los materiales de las tuberías, por lo que es un esfuerzo extra al momento de obtener las predicciones el intentar pronosticar si la magnitud de daños es menor, mayor o simplemente parecida, teniendo en cuenta que dicha posible diferencia de resiliencia no debiese ser muy grande claramente. Segundo, el evaluar tantos escenarios diferentes puede hacer que se pase por alto que cada uno de estos posee una diferente probabilidad de ocurrencia, es importante recordar que análisis de eventos de intensidad media y baja pueden ser más relevantes para estudios previos de mitigación y planificación, que los que se podrían realizar a eventos derechamente catastróficos, dado que estos son poco probables, pero los que más llaman la atención.

Desde una perspectiva más positiva, los resultados del modelo permiten asociar factores de relevancia, como material de la red, diámetros y suelo que los rodea, a las fallas que se podrían presentar, y así especular un análisis un tanto mas acertado para diferentes eventos. Asimismo, y mas importante aún, se pueden detectar lugares de mayor importancia de intervención ante un terremoto, optimizando el gasto de recursos y tiempo que tendrían que emplear los responsables de reparar los daños resultantes.

Existen cosas que se podrían incluir en el modelo las cuáles ayudarían a implementar y

obtener resultados mas concisos y completos sobre la red dañada. Por ejemplo, el incluir la totalidad de los elementos de la red ayudaría a comprender mejor el impacto de la amenaza sísmica, siendo dichos elementos las bombas y estanques por ejemplo. Un paso posible de implementar de forma pronta, es incluir la amenaza de incendio debido a sismo (FFE), la cuál ha sido desarrollada pero no se implementó en este trabajo dado que se finalizó cuando esta memoria ya estaba en desarrollo.

El PGA resulta ser una medida muy útil para el presente proyecto. Obtenidos los datos de falla y el mapa de la USGS que sectoriza los valores de PGA, se lograron asociar los efectos y las magnitudes de los daños de una forma que hace sentido entre lo teórico y lo práctico.

Se concluye que el modelo es una base sólida de análisis predictivo, cuando se trata de amenazas sísmicas. El buscar incluir factores más específicos de suelos es una posible (pero ardua) mejora que podría llevarse a cabo, esto aportaría con una mejor localización de las posibles fallas, dadas las características ya preconcebidas de los suelos conocidos. También, una mejora sería el desarrollar un modelo que considerara la red y el cómo se ve afectada por la amenaza sísmica en períodos mas largos de tiempo, considerando talvez, varios eventos y escenarios de diferentes magnitudes, tomando en cuenta el factor de ocurrencia probabilística que acompaña a los sismos en sus diferentes intensidades.

Bibliografía

- Abarca, D. (2022). Marco de análisis de riesgo multi-amenaza en redes de agua potable.
- Alliance, A. L. (2001). Seismic fragility formulations for water systems, part i - guideline. USA. ASCE.
- Baker, J. W. (2013). An introduction to probabilistic seismic hazard analysis.
- Bellagamba, X., Bradley, B. A., Wotherspoon, L. M., and Hughes, M. W. (2019). Development and validation of fragility functions for buried pipelines based on canterbury earthquake sequence data. *Earthquake spectra*, 35.
- Eidinger, J. M. (2012). Performance of water systems during the maule mw 8.8 earthquake of 27 february 2010. *Earthquake spectra*, 28:605–620.
- Falcón, M., Ramírez, P., Marín, M., and Arenas, M. (2010). Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de concepción-talcahuano-hualpén-chiguayante, región del biobío. mapa 12-2: Peligro de licuefacción. *Geología para la reconstrucción y la gestión del riesgo*, 1.
- Fernández Fuenzalida, G. A. A. (2021). Diseño de una metodología general para la identificación de elementos críticos en redes de distribución de agua potable.
- Garvs Martínez, I. M. (2020). Desarrollo de curvas de fragilidad para sistemas de distribución de agua en chile.
- Guzmán, A. (2011). Estudio de la interacción suelotubería en las redes de agua potable y aguas servidas del gran concepción.
- Guzmán, A., Bravo, R., Villalobos, F., and Montalva, G. (2012). Estudio preliminar de roturas de tuberías de agua potable en el gran concepcion. In *Proc., 7th Congreso Chileno de Geotecnia*.
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., and Pastén, C. (2017). Ground motion prediction equations for the chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15:1853–1880.
- Jacobson, A. and Grigoriu, M. (2008). Fragility analysis of water supply systems. Technical report, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Klise, K., Hart, D., Bynum, M., Hogge, J., Haxton, T., Murray, R., and Burkhardt, J. (2020). Water network tool for resilience (wntr). user manual, version 0.2. 3. Technical report, Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- Miyajima, M. (2014). Performance of earthquake resistant drinking water pipeline during the 2011 tohoku earthquake in japan. In *10th US National conference on earthquake engineering, frontiers of earthquake engineering*, Earthquake Engineering Research Institute,

Anchorage, USA.

- Montalva, G. A., Bastías, N., and Rodriguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107:901–911.
- NIBS (1999). Hazus earthquake loss estimation methodology. *Technical manual*.
- Philip, S. E. and Santhi, M. H. (2020). Peak ground acceleration analysis using past earthquake data. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1716. IOP Publishing.
- Pineda, O. (2006). Estimación de daño sísmico en tuberías enterradas. *Doctorate of Engineering Thesis*.
- Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., and de la Llera, J. C. (2019). An updated recurrence model for chilean subduction seismicity and statistical validation of its poisson naturean updated recurrence model for chilean subduction seismicity and statistical validation of its poisson nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109:66–74.
- Shamir, U. and Howard, C. D. (1979). An analytic approach to scheduling pipe replacement. *Journal-American Water Works Association*, pages 248–258.
- Su, Y.-C., Mays, L. W., Duan, N., and Lansey, K. E. (1987). Reliability-based optimization model for water distribution systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113:1539–1556.
- Yoon, S., Lee, D. H., and Jung, H.-J. (2019). Seismic fragility analysis of a buried pipeline structure considering uncertainty of soil parameters. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 175.

Anexos

Anexo A. Diametros.py

```
1 import wntr
2 wn_sd = wntr.network.WaterNetworkModel('concepcionNoDiametros.inp')
3 wn_nd = wntr.network.WaterNetworkModel('concepcionNodosDuplicados.inp')
4
5 for tuberia in wn_sd.pipe_name_list:
6     pipe = wn_sd.get_link(tuberia)
7     A = pipe.start_node
8     coordA = A.coordinates
9     B = pipe.end_node
10    coordB = B.coordinates
11    print('Revisando coincidencias de '+pipe.name)
12    for tuberia2 in wn_nd.pipe_name_list:
13        pipe2 = wn_nd.get_link(tuberia2)
14        A2 = pipe2.start_node
15        coordA2 = A2.coordinates
16        B2 = pipe2.end_node
17        coordB2 = B2.coordinates
18        if ((coordA == coordA2 and coordB == coordB2) or (coordA == coordB2 and coordB
19        ↪ == coordA2)):
20            pipe.diameter = pipe2.diameter
21            print('Coincide con '+pipe2.name)
22            print('Diametro anadido '+str(pipe.diameter))
23    wn_sd.write_infile('concepcionConDiametros.inp')
```

Anexo B. Eliminar_Repe.py

```
1 #-*- coding: utf-8 -*-
2 import wntr
3
4 wn_fin = wntr.network.WaterNetworkModel('concepcionConDiametros_fin.inp')
5 f1 = open('APC_prueba_malo.txt','rt') #txt de red usada aca arriba
6 f2 = open('APC_corregida_fin.txt','wt') #archivo existente pero en blanco
7 checkWords = []
8 repWords = []
9
10 for nodo in wn_fin.node_name_list:
11     coordenadas = (wn_fin.get_node(nodo).coordinates)
12     print('Las coordenadas de '+nodo+' son '+str(coordenadas))
13     for nodo2 in wn_fin.node_name_list:
14         coordenadas2 = (wn_fin.get_node(nodo2).coordinates)
15         if nodo2 == nodo:
16             print('Mismo nodo '+nodo+' '+nodo2)
17         elif coordenadas == coordenadas2 and nodo2 != nodo:
18             print('Las coordenadas de '+nodo+' y '+nodo2+' son '+str(coordenadas))
19             repWords.append(str(nodo)+" ")
20             checkWords.append(str(nodo2)+" ")
21
22 for line in f1:
23     for check, rep in zip(checkWords, repWords):
24         line = line.replace(check, rep)
25     f2.write(line)
26 f1.close()
27 f2.close()
```

Anexo C. Escenarios de Desastre

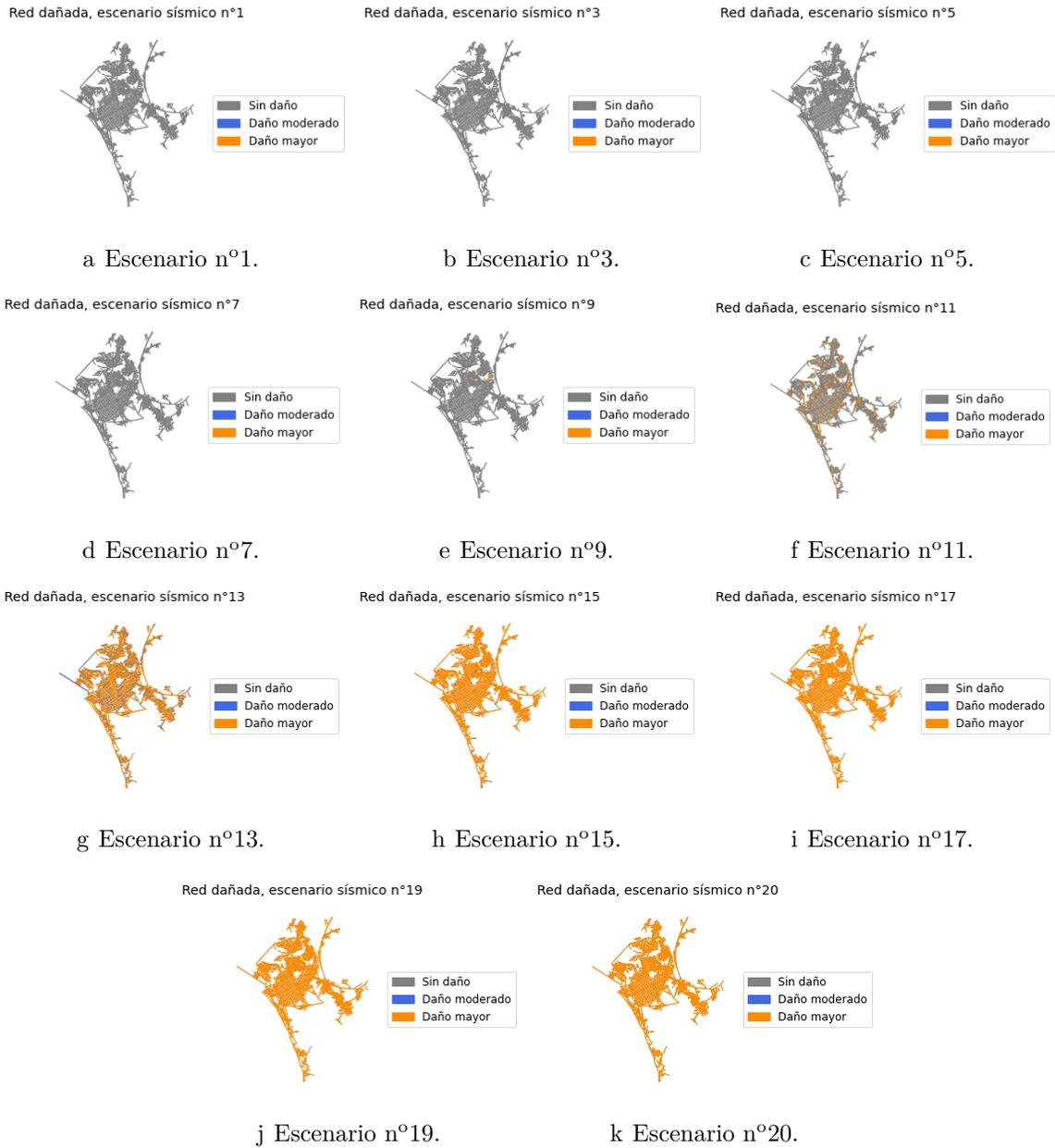


Figura .1: Escenarios sísmicos relevantes.