

Seismic risk assessment and sensitivity analysis of a large drinking water distribution network in Valparaíso, Chile

J. Muñoz (1), J. de la Llera (1,2), S. Castro (1), Y. Alberto (1), A. Poulos (2), F. Arróspide

(1) *Research Center for Integrated Disaster Risk Management (CIGIDEN) ANID/FONDAP/1522A0005*

(2) *Pontifical Catholic University of Chile*

(3) *Stanford University*

1. Resumen

Las Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP) son críticas para la población y otras redes interdependientes. Los elementos vulnerables pueden ser superficiales o enterrados, como estanques y tuberías. Mientras los primeros son evidentemente críticos debido a su reducido número, no es así para los segundos. Estudiar el efecto del daño sísmico de las tuberías en una RDAP es difícil debido a su redundancia, y a los miles de kilómetros de tuberías con diferentes materiales, diámetros y condiciones de suelo. Este artículo explica un modelo capaz de realizar este estudio, construido en EPANET para la RDAP de la conurbación de Valparaíso, Viña del Mar y Concón, en Chile central. Se realizó un análisis de riesgo sísmico considerando 50,000 escenarios de velocidad máxima del suelo (*PGV*) como medida de intensidad, tres modelos de vulnerabilidad sísmica de las tuberías (*RR*), y dos modelos de estados de daño. Una simulación hidráulica estimó el desempeño de la RDAP dañada para cada escenario, en términos de Demanda No Suministrada (*UD*). Se realizó un análisis de sensibilidad, variando el peso los modelos *RR*, cambiando el modelo de probabilidad de rotura, y variando sus parámetros. Los resultados de riesgo exhiben gran sensibilidad a los supuestos de modelamiento. Además, los resultados muestran que la red colapsa cuando el daño alcanza aproximadamente un 30% de las tuberías, en términos de longitud.

Palabras clave: análisis de sensibilidad de riesgo sísmico, red de distribución de agua potable, daño a las tuberías

2. Abstract

Drinking Water Distribution Networks (DWDN) are critical to people and other interdependent lifelines. Elements vulnerable to seismic effects may be on the surface or buried, such as tanks and pipes. While the former elements are evidently critical, given their small number, it is different for the latter. Assessing the effect of pipe seismic damage effects in a DWDN is difficult given its redundancy, and the thousands of kilometers of pipes with different materials, diameters and soil conditions. This research describes a model capable of this assessment, built in EPANET for the DWDN of the conurbation of Valparaíso, Viña del Mar, and Concón, in central Chile. A seismic risk assessment was performed considering 50,000 scenarios of Peak Ground Velocity, three seismic vulnerability models, and two damage-state models. A hydraulic analysis was carried out for each scenario to assess the performance of the DWDN in terms of unsupplied water demand. A sensitivity analysis of risk results was carried out by weighing the different vulnerability models, changing the pipe breaking probability model, and changing its parameters. Risk results exhibit high sensitivity to the different modeling assumptions. Also, current results show that the water service is shut down completely if damage reaches about 30% of the pipes.

Keywords: seismic risk sensitivity analysis, Water distribution network, pipe damage-states

3. Introducción

El riesgo de interrupción del servicio de los sistemas de distribución de agua potable en zonas expuestas a sismos debe ser estudiado y gestionado para mantener un nivel adecuado de desempeño durante y después de un evento sísmico. Esto es particularmente importante en ciudades modernas porque una interrupción del servicio tiene impactos negativos en la población, directos e indirectos, y también afecta otras líneas críticas interdependientes con la red de salud. Estudiar el riesgo sísmico de forma eficiente, metódica y rigurosa es una tarea difícil, porque una Red de Distribución de Agua Potable (RDAP) es un sistema de gran tamaño y complejidad, con alta redundancia y compuesta por miles de kilómetros de tuberías de distintos materiales y diámetros, enterradas en suelos de distintas condiciones, sin contar todos los otros elementos de la red, como estanques, válvulas y bombas. Se requiere un modelo detallado de la RDAP bajo estudio para lograr el objetivo de entender su comportamiento sísmico y proponer medidas de preparación y mitigación. El daño sísmico en RDAPs ha sido estudiado en el pasado (e.g., [1–4]), usualmente enfocado en el daño a las tuberías, dado que su número supera con creces a otros elementos del sistema. Las tuberías se ven sometidas a la propagación de ondas sísmicas y a la deformación del suelo, lo que requiere de modelos apropiados para estimar velocidad máxima del suelo (*Peak Ground Velocity, PGV*) para el primero, y deformación permanente del suelo (*Permanent Ground Displacement, PGD*), para el segundo, dado que se ha observado que el PGV se relaciona con la vibración del suelo, mientras que el PGD se asocia a varios modos de falla de las tuberías [5,6]. Por ejemplo, las deformaciones inducidas por licuefacción, que pueden producir desplazamientos laterales y asentamientos de masas de suelo, entre otros fenómenos, han causado daño significativo en terremotos anteriores [7]. A pesar de que la deformación del suelo causa daños más severos, suele concentrarse en áreas más limitadas, mientras que la propagación de ondas es un fenómeno de gran extensión. Con lo anterior en mente, este artículo se enfoca en el efecto de la propagación de ondas (i.e., PGV) para proponer un marco conceptual para la estimación de riesgo sísmico en una RDAP, el que se aplica a las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar y Concón, una conurbación en la costa central de Chile. Un análisis probabilístico de amenaza sísmica se emplea para simular escenarios consistentes de valores de PGV distribuidos en el territorio estudiado; el daño sísmico a las tuberías se estima combinando tres modelos de vulnerabilidad sísmica de *Repair Rate (RR)*; mientras que se usan dos modelos para muestrear el estado de daño de las tuberías (fisura o rotura), a partir de su valor de RR. Los resultados se procesan para obtener curvas de riesgo sísmico de la Demanda No Suministrada (*Unsupplied Demand, UD*) de toda la red, y se realiza un análisis de sensibilidad para cuantificar el efecto de cambiar supuestos de modelación.

4. Construcción del modelo

La RDAP de Valparaíso, Viña del Mar y Concón fue modelada en el software EPANET [8], por su simplicidad, amplio uso, y por ser de código abierto. Los modelos EPANET consideran un conjunto de componentes básicos como nodos, tuberías, válvulas, reservorios y estanques, los que se definen en este caso en base a información suministrada por ESVAL y la Superintendencia de Servicios Sanitarios. EPANET permite que el usuario implemente elementos avanzados en el modelamiento de la red, como bombas, patrones de tiempo, condiciones de calidad del agua, etc. Sin embargo, debido a la limitada cantidad de información disponible para este estudio, se realizaron diversas simplificaciones y supuestos. En los próximos párrafos, se describe el proceso de modelamiento de la red en EPANET.

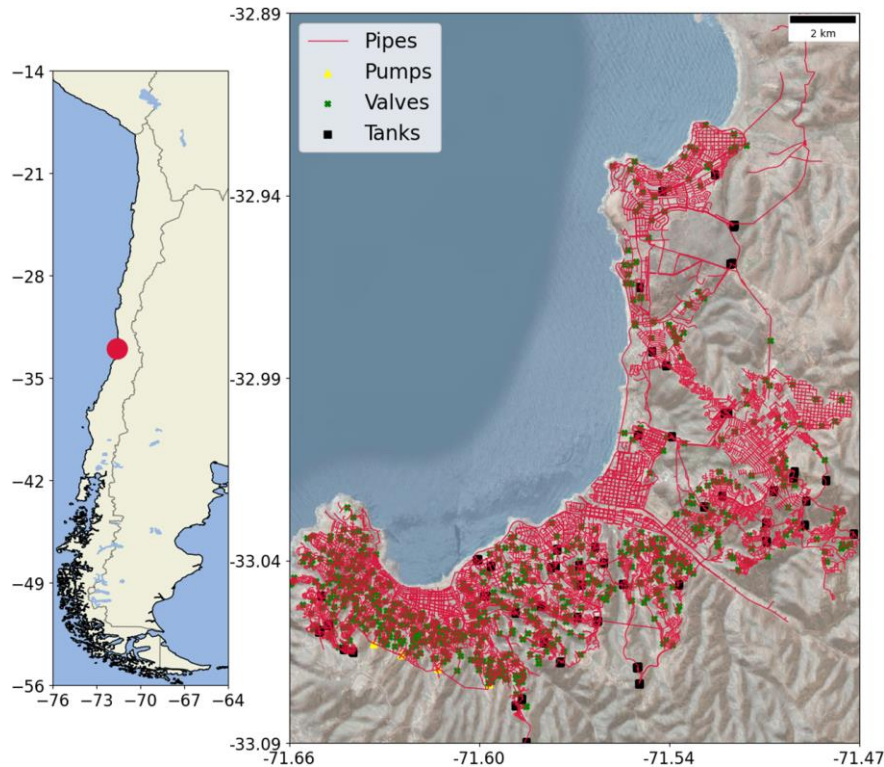


Figura 1: Red de distribución de agua potable de la conurbación de Valparaíso, Viña del Mar y Concón.

4.1. Software and raw data sources used in network modelling

Como se mencionó, los datos necesarios para construir el modelo de EPANET fueron suministrados por ESVAL, la empresa encargada del suministro de agua potable en la conurbación. Los archivos entregados incluyeron datos en formato *GIS shape file*, donde estanques y válvulas son representados como puntos, mientras que las tuberías son representadas con polilíneas, como se observa en la Figura 1. Estos elementos fueron incluidos en EPANET usando los objetos [TANKS], [VALVES] y [PIPES], respectivamente. Los vértices de las polilíneas de las tuberías fueron modelados con objetos [NODES] en EPANET, los que se requieren en el modelo para introducir la demanda de la red.

Los atributos más importantes de *shapefile* incluyen elevación de los estanques, diámetro de las tuberías, material de las tuberías, altura hidráulica de las bombas, y diámetros de las válvulas. La Tabla 1 muestra un resumen de la información disponible en crudo. La demanda de agua potable fue incluida en el modelo usando el valor medio anual registrado por los flujómetros de ESVAL, cuyas ubicaciones era conocidas. Sin embargo, dado que estas no coincidían con las polilíneas de las tuberías, fue imposible realizar una asignación directa de demanda a los nodos de la red. Para solucionar este problema, un código en Python fue implementado para asignar el valor de un flujómetro al vértice más cercano. La mayor parte del suministro de agua proviene de estanques ubicados en terrenos elevados, lo que permite que la gravedad transporte el agua a los sectores más bajos. Sin embargo, también hay varios estanques ubicados en terreno bajo, por lo que necesitan de bombas para proveer de agua a los habitantes de la ciudad. Los datos de ESVAL incluyen la ubicación, altura hidráulica y potencia de cada estación de bombeo, pero no la curva de operación, que es idealmente requerida por EPANET para una adecuada representación en el modelo. Por tanto, el modelo fue simplificado tomando la altura hidráulica de una estación de bombeo y sumando dicho valor a la altura hidráulica de los estanques asociados. Esta simplificación implica que el régimen de operación de bombeo es constante o, en otras palabras, que se bombea en régimen.

Tabla 1: Resumen de los datos disponibles en crudo

Componente	Tipo de archivo	Atributos principales
Estanques	Shapefile (.shp)	Latitud, longitud, elevación, niveles máximo y mínimo
Tuberías	Shapefile (.shp)	Latitud, longitud, diámetro material
Válvulas	Shapefile (.shp)	Latitud, longitud, diámetro, presión, configuración
Demanda	Planilla MS Excel (.xlsx)	Latitud, longitud, volumen mensual

4.2. Configuración del modelo

Todos los componentes descritos en la sección anterior fueron integrados en el modelo usando códigos en Python 3.7. El *shapefile* de los estanques no se encontraba conectado al *shapefile* de las tuberías, por lo tanto, los conectamos manualmente creando tuberías adicionales cuyos atributos fueron definidos con los mismos valores usados en las tuberías que debían conectarse a los estanques. Las tuberías y válvulas fueron consideradas todas en “buenas condiciones” y sin ningún tipo de deterioro previo. En la realidad, algunas tuberías pueden tener hasta 50 años de antigüedad, pero por simplicidad y disponibilidad de datos, este aspecto no fue considerado. Todos los objetos de tubería [PIPES] fueron creados en estado abierto (“OPEN”). Una vez el modelo de EPANET fue creado, se ejecutó la simulación hidráulica, y se aplicó un proceso iterativo para corregir la orientación de las válvulas, hasta que los valores de presión en las tuberías se encontraran dentro de rangos aceptables por ESVL, como se observa en la Figura 2a.

5. Amenaza sísmica

La amenaza sísmica de la región bajo estudio fue caracterizada usando 50,000 escenarios de terremotos, generados con el modelo de recurrencia desarrollado para Chile [9], que consiste de fuentes sísmicas de tipo *interface* e *intraslab*, asociadas con la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Se simularon eventos con magnitud $M_w \geq 5$, se usó también *importance sampling* [10] para aumentar la proporción de escenarios de terremotos de alto impacto, al considerar una distribución uniforme de magnitudes de terremoto, en lugar de la verdadera distribución de probabilidades de la magnitud (i.e., una combinación de distribuciones exponenciales truncadas). Más aún, solo se consideraron fuentes sísmicas cercanas a la conurbación, y los hipocentros de las realizaciones sísmicas fueron muestreadas asumiendo una distribución uniforme dentro de cada zona sísmica. Una vez las magnitudes e hipocentros fueron obtenidos, se generaron mapas de *PGV* usando el modelo de movimiento del suelo (*GMM*) desarrollado por Parker [11], considerando los valores de ajuste regional propuestos para Sudamérica. Las distancias a la rotura (i.e., la menor distancia entre un sitio y la superficie de rotura), que es requerida por el *GMM* para estimar *PGV*, fue calculada usando el modelo de escalamiento desarrollado por Strasser [12]. Además, la correlación espacial de las estimaciones de *PGV* en los sitios fue considerada con el modelo desarrollado por Goda [13], que solo depende de la distancia entre los sitios.

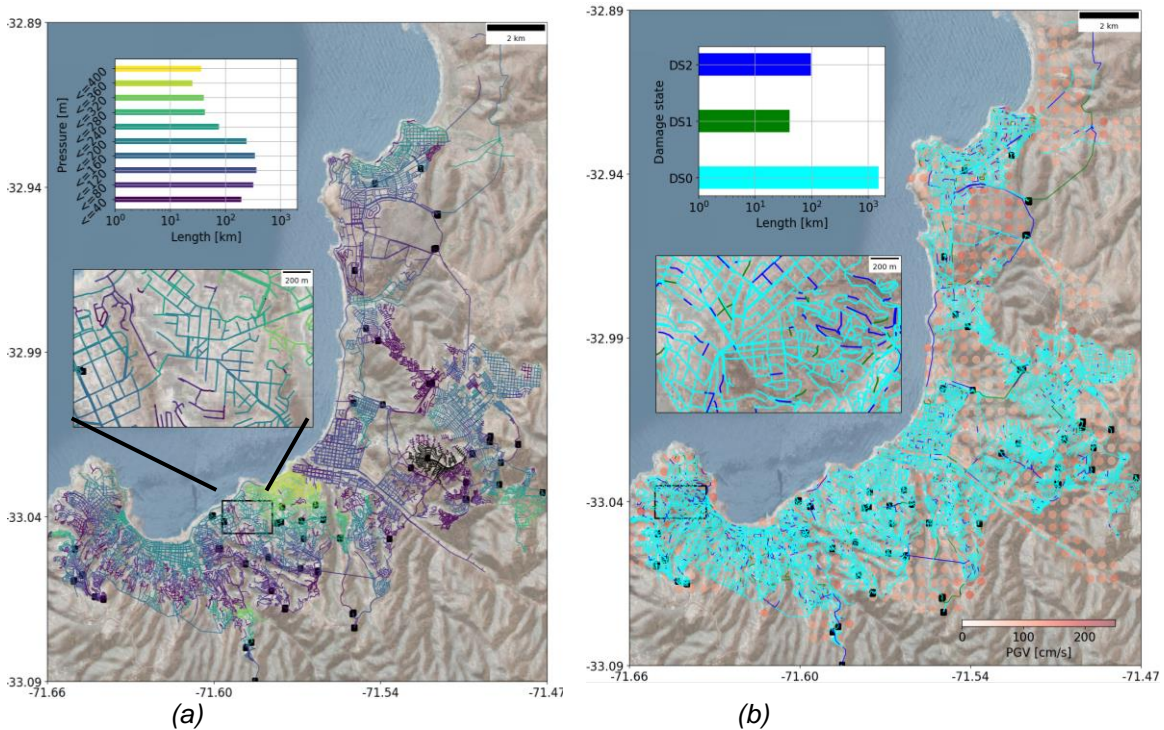


Figura 2: Izquierda: distribución de presión en las tuberías de la red sin daño. Derecha: escenario de daño para una realización con demanda no suministrada UD= 70%, que muestra las tuberías sin daño (cyan), fisuradas (verde) y rotas (azul).

6. Vulnerabilidad de las tuberías

Uno de los posibles objetivos de un análisis de riesgo es identificar componentes críticos de una red, para así determinar medidas de preparación y mitigación adecuadas que garanticen una operación normal de la red. Evidentemente, tanto estanques como bombas son elementos críticos, debido a su rol y reducido número. Sin embargo, no es simple decir lo mismo de las tuberías. Con esto en mente, es posible estudiar la distribución de importancia de las tuberías asumiendo que solo ellas pueden sufrir daño ante la ocurrencia de un sismo, porque esto aísla el efecto del daño en las tuberías en el funcionamiento de la red. El daño en las tuberías es modelado con funciones de vulnerabilidad que representan la tasa de reparación (*Repair Rate, RR*) de un elemento después de un evento sísmico, que corresponde al número promedio de fallas en una tubería por unidad de longitud. El *RR* es una función de la velocidad máxima del suelo (*PGV*), de la deformación permanente del suelo (*PGD*), y de propiedades de la tubería. Dada la ocurrencia de una falla, esta puede corresponder a uno de dos estados de daño: fisura (daño leve) y rotura (daño severo). La mayor parte de los estudios consideran el supuesto de que cuando una tubería se daña por *PGV*, el 80% de las fallas corresponde a fisuras y el 20% a roturas, mientras que los porcentajes se invierten cuando el daño es causado por *PGD* [5]. Dado que no hay modelos para estimar *PGD* en la zona bajo estudio, esta investigación considera solo *PGV* para calcular *RR*. Esto fue realizado con tres modelos distintos propuestos en la literatura, que fueron combinados en una única estimación de *RR*.

El primer modelo de *RR* fue propuesto por ALA [5]:

$$RR_{ALA} = 0.00126 K_1 PGV^{1.173} + \epsilon \quad (1)$$

$$K_1 = K_m \cdot K_d \quad (2)$$

, donde *RR* está en [reparaciones / kilómetro]; *PGV* en [cm/s]; K_1 es un factor de corrección que considera materialidad (K_m) y diámetro (K_d) de la tubería; y ϵ es un residual de la regresión. Este modelo se basa en datos de 18 terremotos de las Américas y Japón, incluyendo Kobe, Loma Prieta y Ciudad de México.

El segundo modelo fue desarrollado para Japón [14]:

$$RR_{ISO} = 3.11 \times 10^{-3} C (PGV - 15)^{1.30} + \epsilon \quad (3)$$

$$C = C_m C_d C_T C_I \quad (4)$$

, donde RR está en [reparaciones / kilómetro]; PGV en [cm/s]; C es un factor de corrección que considera materialidad (C_m) y diámetro (C_d) de la tubería, topografía del terreno (C_T), y potencial de licuefacción del suelo (C_I); y ϵ es un residual de la regresión. Este modelo se basa en el daño causado por el terremoto de Kobe (1995) a las ciudades de Ashiya e Ishinomiya..

El tercer modelo fue desarrollado para Nueva Zelanda [15]:

$$\ln RR_{Bei} = f_0(PGV) + \sum_{i=1}^n C_i(h_i) + \epsilon = a + b PGV + a_0 PGV^{b_0} + \epsilon \quad (5)$$

, donde RR está en [reparaciones / kilómetro]; PGV en [cm/s]. El valor de RR depende del PGV de acuerdo a la función f_0 , y a una serie de factores de corrección C_i que dependen de los parámetros h_i . Después de reordenar la expresión, los parámetros de la regresión a , b , a_0 y b_0 dependen materialmente de la tubería, de su diámetro, y de la resistencia cíclica del suelo (*soil cyclic resistance ratio*, CRR). Este modelo se basa en el terremoto de Christchurch y provee una detallada cuantificación de la incertidumbre ϵ .

Para cada tubería, el valor de PGV fue estimado como el promedio del valor de sus nodos extremos, y este valor fue utilizado para calcular RR de acuerdo a las Ecs. (1) a (5). Luego, las predicciones de los tres modelos de RR fueron combinadas usando pesos iguales para el caso base, y otra distribución de pesos para el análisis de sensibilidad que se presenta en la sección siguiente. Una vez se calculó un valor de RR para una tubería, se estimó el número total de fallas a partir de una distribución de Poisson:

$$f(x, \lambda) = P(X = n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \quad (6)$$

Donde el parámetro de la distribución de Poisson, $\lambda = RR \cdot L$, corresponde al número esperado de fallas en una tubería de longitud L y RR reparaciones esperadas por unidad de longitud; y n es el número total de fallas, considerando tanto fisuras como roturas, $n = n_{breaks} + n_{leaks}$. Como es esperable, las tuberías más largas tienen en promedio más fallas, dado el mismo RR . Como se mencionó antes, la mayoría de los estudios emplea el supuesto de ALA [5] y HAZUS [16] para determinar n_{breaks} y n_{leaks} . Entonces, dada una tubería, es posible obtener el valor de PGV desde el escenario de amenaza sísmica y las coordenadas de los nodos de la tubería, calcular el valor de RR asociado con las Ecs. (1) a (5), muestrear el número de fallas con la Ec. (6), y luego muestrear la naturaleza de cada falla considerando que la probabilidad de que sea fisura es 80%. El principal problema de este último supuesto es que la proporción de fisuras y roturas es independiente del valor de PGV , lo que no es realista, dado que es esperable que para valores muy bajos de PGV todas las fallas sean fisuras, mientras que para valores muy altos de PGV todas las fallas deberían ser roturas. Para tomar esto en consideración, un modelo más realista ha sido propuesto, haciendo que la proporción de fisuras y roturas sea una función del PGV . En particular para este estudio, en base a resultados de otra investigación [17], se consideró que para valores de velocidad máxima del suelo $PGV < 45$ cm/s todas las fallas son fisuras, mientras que para $PGV > 95$ cm/s las fallas solo corresponden a roturas. Para valores intermedios de PGV , la probabilidad de rotura se obtiene interpolando linealmente entre los dos puntos anteriores.

7. Modelo hidráulico considerando daño

Una vez determinado el daño sísmico en las tuberías a partir del procedimiento descrito en la sección anterior, el próximo paso consistió en aplicarlo al modelo hidráulico. Por un lado, las fisuras fueron representadas en EPANET con objetos de tipo [EMITTER], el que es un componente opcional asociado a los nodos, que produce una pérdida de agua en función de la presión. El flujo de agua a través de un *emitter* se calcula en EPANET con una forma generalizada de la ecuación de Torricelli que caracteriza el flujo de agua a través de un agujero en un

estanque, como se muestra en la Ec. (7), donde el flujo de agua Q es una función de la presión H del nodo, del exponente n que caracteriza al *emitter*, y del coeficiente de flujo C , que es a su vez una función del área A de la sección transversal del agujero, de la aceleración de gravedad g , y del coeficiente de descarga $C_d < 1$, que depende de pérdidas de energía debido a turbulencias en el flujo. En EPANET, C puede ser definido de forma individual para cada *emitter*, mientras que el valor de n es definido de forma global para todo el modelo.

$$Q = \frac{C_d A (2g)^n}{c} H^n = CH^n \quad (7)$$

Por lo tanto, un *emitter* puede ser completamente caracterizado al seleccionas un exponente n , un área A de la sección transversal del agujero, y un coeficiente de descarga C_d . Notar que tanto A como C_d son en realidad variables aleatorias porque las fisuras pueden tener distintos tamaños, mientras que las pérdidas de energía dependen de distintos factores, como la razón de aspecto de la fisura. Si como resultado del muestreo sucede que una tubería tiene múltiples fisuras, todas se generan de forma independiente respetando la aleatoriedad, y luego se combinan en un único *emitter* equivalente al sumar sus coeficientes de flujo C . En base a estudio previos [18,19], se asume que el área de la sección transversal de la fisura sigue una distribución uniforme, cuyos parámetros son función del área de la sección transversal de la tubería, A_0 .

$$A \sim U(0.05A_0, 0.10A_0) \quad (8)$$

De forma similar, se asume que el coeficiente de descarga C_d sigue una distribución normal cuyos parámetros dependen de la altura hidráulica H , en metros columna de agua [20]:

$$C_d \sim \begin{cases} 0.5 & , H < 20 \\ N(0.575, 0.026) & , 20 \leq H < 30 \\ N(0.650, 0.030) & , 30 \leq H < 45 \\ N(0.725, 0.035) & , 45 \leq H < 60 \\ N(0.800, 0.039) & , 60 \leq H \end{cases} \quad (9)$$

Por otro lado, la rotura de una tubería fue modelada con una modificación a la topología de la red (i) removiendo la tubería; (ii) reemplazándola con dos medias tuberías que van desde los nodos extremos hasta el punto central de la tubería original, donde la altura se obtiene por interpolación lineal; (iii) agregando un reservorio vacío en el extremo libre de cada media tubería (i.e., un reservorio con altura hidráulica igual a su altura geométrica); y (iv) agregando válvulas de control en cada media tubería, de manera que el agua solo puede fluir hacia los reservorios y no desde ellos. Al seguir el procedimiento anterior, la rotura de una tubería desconecta porciones importantes de la red y permite pérdidas considerables de masa y presión. Cada vez que una tubería experimenta simultáneamente fisuras y roturas, solo la última se modela, porque la pérdida de agua y presión de la primera es despreciable en comparación. Adicionalmente, a lo más una rotura es modelada para cada tubería, dado que cualquier rotura subsecuente no tiene efecto en la red.

Habiendo modelado el daño en la RDAP, como se muestra en la Figura 2b, se corre en EPANET un análisis hidráulico basado en presiones. El desempeño de la red se mide considerando la demanda no suministrada (*Unsupplied Demand, UD*) como variable de salida, como se define en la Ec. (10), donde q_{D_i} es el agua que es efectivamente suministrada al nodo i por la red, y D_i es la demanda de agua requerida por el nodo i . Es posible notar que un valor $UD = 0$ implica que la RDAP se encuentra completamente operacional, mientras que $UD = 1$ significa que no se provee agua a ningún nodo de la red.

$$UD = 1 - \frac{\sum_i q_{D_i}}{\sum_i D_i} \quad (10)$$

8. Análisis de riesgo sísmico y sensibilidad

Se realizó un análisis de riesgo [10,21] considerando 50,000 escenarios sísmicos. Para cada uno, el estado de daño de las tuberías fue muestreado como se explicó antes, se corrió una simulación hidráulica, y se calculó la Demanda No Suministrada, UD . Estos valores fueron luego combinados en una curva de riesgo, como se muestra en la Figura 3, donde la curva en rojo corresponde a los resultados obtenidos cuando se usa el supuesto

de ALA para la probabilidad de rotura de las tuberías, mientras que la curva azul corresponde al modelo de probabilidad de rotura dependiente del PGV . Se puede notar que el modelo escogido afecta considerablemente los resultados, porque el supuesto de ALA subestima el número de roturas para escenarios de gran magnitud. Además, la Figura 4 muestra que la RDAP es muy robusta bajo ambos supuestos, presumiblemente debido a su alta redundancia, puesto que se observan altos períodos de retorno para todo el rango de UD .

A pesar de que la curva de riesgo de Demanda No Suministrada, UD , es un resultado útil por sí mismo, se requiere información adicional para entender mejor el desempeño sísmico de la RDAP. Por ejemplo, la red se compone de decenas de miles de kilómetros de tuberías, por lo que una pregunta lógica sería qué fracción de la longitud total de tuberías en la red (L_{tot}) debe romperse para que el sistema alcance un cierto nivel de UD . Esto se ilustra en la Figura 4^a, que muestra los resultados para el modelo de rotura dependiente del PGV . Se puede inferir que la RDAP colapsa cuando alrededor del 20% a 30% de sus tuberías (en términos de longitud) presentan roturas, aunque puede colapsar antes si algunas tuberías críticas sufren daño (e.g., aquellas conectadas directamente a los estanques). Para valores pequeños de la fracción de longitud total de tuberías con rotura (L_{br}/L_{tot}), el valor de UD crece rápida y linealmente hasta que cerca de un 4% de las tuberías presentan roturas, donde el valor de UD puede tomar valores aproximadamente entre 40% y 70%. Pasado ese punto, el comportamiento es más no-lineal, y la variabilidad tiende a disminuir. También puede notarse en los histogramas marginales que la mayoría de los escenarios sísmicos producen valores bajos de UD , y solo un grupo pequeño genera las mayores pérdidas. Esto también se puede apreciar mejor en la Figura 4b, que muestra como solo los escenarios con magnitud $M_w > 8$ producen valores de UD mayores a 10%, aunque con una variabilidad significativa en los resultados. Se requieren más estudios para entender mejor cuáles escenarios tienden a causar más daño y por qué, así como también cuáles tuberías son más críticas, tales que su rotura puede repercutir en valores altos de UD , lo que será mostrado en detalle en un artículo de *journal* que se encuentra en preparación.

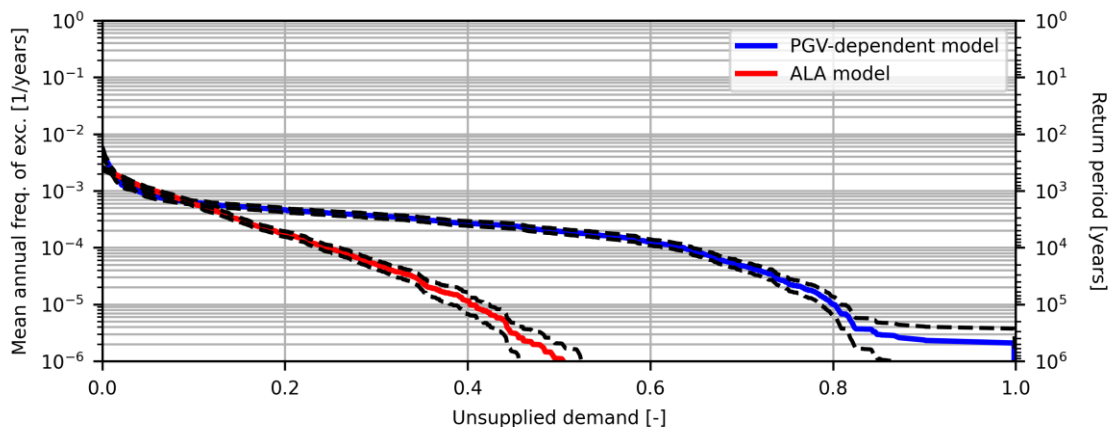


Figura 3: Curva de riesgo de la Demanda No Suministrada (UD), considerando el modelo de ALA y el modelo dependiente del PGV para el cálculo de la probabilidad de rotura. Las curvas segmentadas representan el intervalo de confianza de 95%

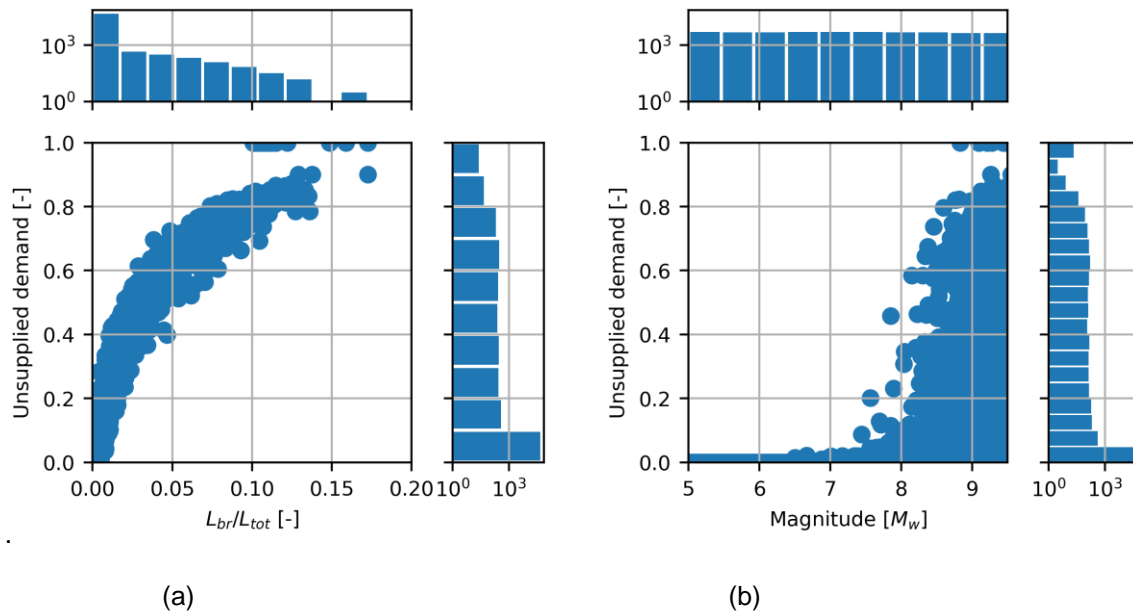


Figura 4: Resumen del análisis de riesgo con el modelo de rotura dependiente del PGV. Izquierda: no-linealidad de la Demanda No Suministrada (UD) como función de la fracción tuberías con rotura en términos de su longitud de. Derecha: daño a la red como función de la magnitud del evento sísmico

Dado que el modelo de ALA para la probabilidad de rotura se asume en la mayoría de los estudios previos, se realizó un análisis de sensibilidad considerando ese modelo para el caso base, para estudiar el impacto del cambio del modelo de *RR* en la curva de riesgo. Como se mencionó antes, los tres modelos de *RR* de las Ecs. (1) a (5) fueron combinados con pesos iguales para estimar el daño sísmico de cada tubería en el caso base. La Figura 5 compara los resultados de este supuesto, y de usar solo uno de los modelos de *RR*. Es posible notar que el impacto del modelo de *RR* escogido es considerable. Mientras que el modelo de *RR* de ALA entrega los valores más bajos de *UD*, bajo 20% en todos los casos, el modelo de *RR* de Isoyama produce el impacto más considerable en la RDAP, alcanzando valores de aproximadamente $UD = 80\%$ para los mismos escenarios sísmicos. Por otro lado, el modelo de *RR* de Bellagamba genera una curva que se ubica aproximadamente en medio del caso base y del modelo de Isoyama.

Otra variable de interés para el análisis de sensibilidad es la probabilidad de rotura del modelo de ALA. La Figura 6 ilustra este efecto, al considerar distintos valores para este parámetro, i.e., 10%, 20%, 40%, 60% and 100%. Se puede concluir que el efecto de la probabilidad de rotura es considerable, y que la presencia de tuberías rotas en la red es lo que controla principalmente la curva de riesgo. Mientras que para el caso base (i.e., probabilidad de rotura de 20%) la Demanda No Suministrada (*UD*) no supera el 50%, la curva de riesgo se mueve hacia la derecha a medida que la probabilidad de rotura aumenta. En última instancia, cuando solo se permiten roturas en las tuberías, la curva de riesgo es similar a la obtenida con el modelo dependiente del PGV. Más aún, el máximo valor de *UD* en la curva de riesgo es de alrededor de 30% cuando la probabilidad de rotura se reduce a la mitad respecto al caso base.

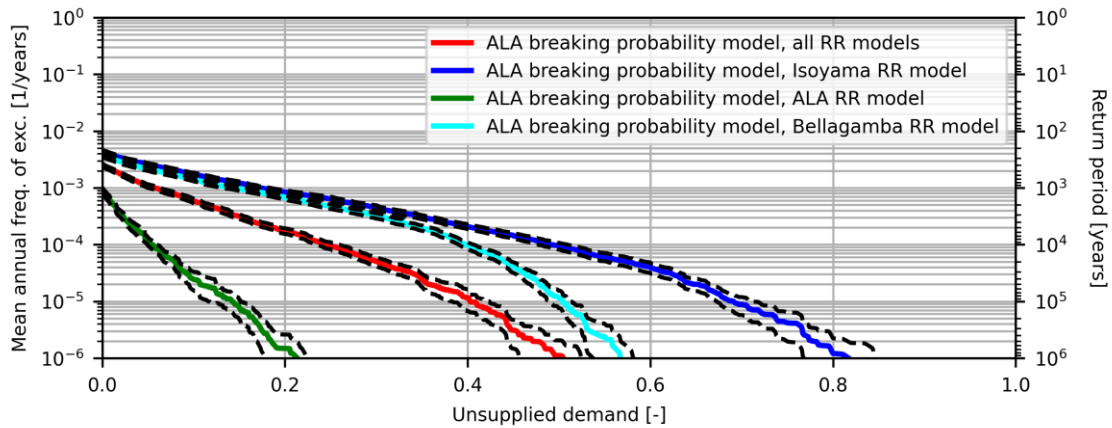


Figura 5: Efecto sobre la curva de riesgo de Demanda No Suministrada (UD) de seleccionar distintos modelos de tasa de reparación (RR)

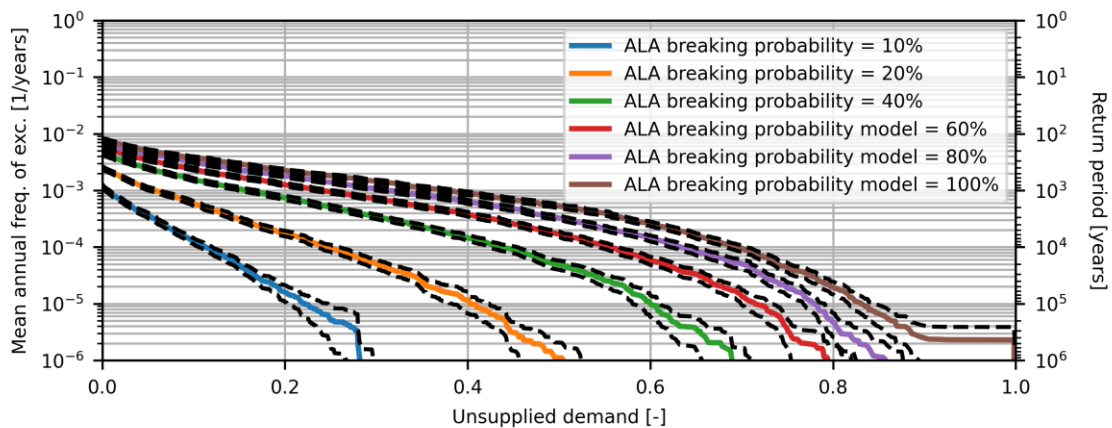


Figura 6: Efecto sobre la curva de riesgo de Demanda No Suministrada (UD), al cambiar la probabilidad de rotura del modelo de ALA

9. Conclusiones

En este artículo se presentó un modelo hidráulico desarrollado para la Red de Distribución de Agua Potable de una gran conurbación en la costa de Chile central, que considera las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar y Concón. El modelo fue calibrado con datos reales obtenidos de ESVAL, la empresa que provee el servicio de agua potable, e implementado en EPANET. Un análisis de riesgo sísmico fue realizado considerando 50,000 escenarios de velocidad máxima del suelo (PGV) en sitios espacialmente distribuidos, generados con modelos adecuados para la sismicidad de la región. El daño sísmico fue restringido solo a las tuberías, para aislar el efecto de su falla en el desempeño general de la red y estudiar su impacto. El daño sísmico fue estimado usando tres modelos de tasa de reparación (RR), y dos modelos de probabilidad de rotura de las tuberías, usando un algoritmo de muestreo en cascada. El daño a las tuberías fue incorporado en el modelo hidráulico mediante el uso de i para el caso de fisuras, mientras que una modificación a la topología se empleó para el caso de las roturas, al interrumpir el flujo de agua a través de las tuberías rotas y modelando la pérdida de agua. Se realizó un análisis hidráulico basado en presiones en EPANET para los escenarios simulados, y la Demanda No Suministrada (UD) fue calculada para cada uno de ellos para cuantificar el desempeño de la RDAP. Los resultados fueron combinados en una curva de riesgo que sugiere que: (i) la RDAP es robusta debido a su redundancia, puesto que se obtuvieron altos períodos de retorno; (ii) la RDAP colapsa cuando alrededor del 20%

a 30% de sus tuberías, en términos de longitud, presentan rotura; (iii) el desempeño de la red sigue una relación no-lineal con el largo total de tuberías rotas y con la magnitud del evento sísmico; y (iv) solo un pequeño subconjunto de escenarios sísmicos causa pérdidas mayores en la red, aunque la variabilidad es considerable. Se realizó un análisis de sensibilidad para estudiar el impacto de supuestos de modelamiento, tales como el modelo de *RR* considerado, y la probabilidad de rotura de las tuberías que se asumió. Se concluye que el efecto de ambos aspectos no puede despreciarse, dado que producen cambios importantes en las curvas de riesgo. Por ejemplo, un cambio en el modelo de *RR* puede cambiar el máximo valor obtenido de *UD* desde 20% a 80%, mientras que una variación de la probabilidad de rotura en el modelo de *ALA* puede generar un impacto similar, desde 50% hasta 100%. Más aún, el uso de un modelo de probabilidad de rotura dependiente del *PGV*, en lugar del modelo de *ALA*, puede tener un impacto similar. Se requiere de más estudios para cuantificar el efecto de los supuestos de modelamiento en los resultados de riesgo, para entender mejor la criticalidad de las tuberías y su impacto en la pérdida de desempeño, y para identificar cuáles eventos sísmicos tienden a producir más daño en la red, lo que será estudiado en una publicación que se encuentra en preparación.

10. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), que ha financiado los proyectos FONDECYT 1170836 “SIBER-RISK: SIMulation Based Earthquake Risk and Resilience of Interdependent Systems and Networks”, FONDECYT 1220292 “Multiscale earthquake risk mitigation of healthcare networks using seismic isolation”, y FONDEF ID22110050 “Plataforma de simulación y evaluación del riesgo para la gestión integrada y planificación óptima de recursos críticos en redes de salud de emergencia para enfrentar condiciones extremas en la demanda hospitalaria”. Del mismo modo, expresamos nuestro agradecimiento a las instituciones que han participado y contribuido a esta investigación, especialmente al Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) ANID/FONDAP/1522A0005.

11. Referencias

- [1] Hamamoto S, Ito L, Tokai A. Assessment of Renewal Priority of Water Pipeline Network against Earthquake Risk. *Water* 2021;13:572. <https://doi.org/10.3390/w13040572>.
- [2] Yoon S, Lee Y-J, Jung H-J. Flow-based seismic risk assessment of a water transmission network employing probabilistic seismic hazard analysis. *Nat Hazards* 2021;105:1231–54. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04352-7>.
- [3] Choi J, Kang D. Improved Hydraulic Simulation of Valve Layout Effects on Post-Earthquake Restoration of a Water Distribution Network. *Sustainability* 2020;12:3492. <https://doi.org/10.3390/su12083492>.
- [4] Cimellaro GP, Tinebra A, Renschler C, Fragiadakis M. New Resilience Index for Urban Water Distribution Networks. *J Struct Eng* 2016;142:C4015014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001433).
- [5] American Lifelines Association. Seismic fragility formulations for water systems. 2001.
- [6] Xu R, Jiang R, Qu T. Review of Dynamic Response of Buried Pipelines. *J Pipeline Syst Eng Pract* 2021;12:03120003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000527](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000527).
- [7] Alberto Y, De la Llera JC, Aguirre P, Monsalve M, Molinos M. Comparative Qualitative and Quantitative Analyses of the Seismic Performance of Water Networks during the Maule 2010, Christchurch 2010–2011, and Tohoku 2011 Earthquakes. *J Water Resour Plann Manage* 2022;148:04022004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001520](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001520).
- [8] US EPA O. EPANET 2014. <https://www.epa.gov/water-research/epanet> (accessed April 10, 2023).
- [9] Poulos A, Monsalve M, Zamora N, de la Llera JC. An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of Its Poisson Nature. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2019;109:66–74. <https://doi.org/10.1785/0120170160>.

- [10] Jayaram N, Baker JW. Efficient sampling and data reduction techniques for probabilistic seismic lifeline risk assessment. *Earthquake Engng Struct Dyn* 2010;n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/eqe.988>.
- [11] Parker GA, Stewart JP, Boore DM, Atkinson GM, Hassani B. NGA-subduction global ground motion models with regional adjustment factors. *Earthquake Spectra* 2022;38:456–93. <https://doi.org/10.1177/87552930211034889>.
- [12] Strasser FO, Arango MC, Bommer JJ. Scaling of the Source Dimensions of Interface and Intraslab Subduction-zone Earthquakes with Moment Magnitude. *Seismological Research Letters* 2010;81:941–50. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.6.941>.
- [13] Goda K, Atkinson GM. Intraevent Spatial Correlation of Ground-Motion Parameters Using SK-net Data. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2010;100:3055–67. <https://doi.org/10.1785/0120100031>.
- [14] Isoyama R, Ishida E, Yune K, Shirozu T. Seismic damage estimation procedure for water supply pipelines, 2000.
- [15] Bellagamba X, Bradley BA, Wotherspoon LM, Hughes MW. Development and Validation of Fragility Functions for Buried Pipelines Based on Canterbury Earthquake Sequence Data. *Earthquake Spectra* 2019;35:1061–86. <https://doi.org/10.1193/120917EQS253M>.
- [16] FEMA. Hazus–MH 2.1 Technical Manual. Multi-hazard Loss Estimation Methodology - Earthquake model. 1997.
- [17] Lanzano G, Salzano E, Santucci de Magistris F, Fabbrocino G. Seismic vulnerability of gas and liquid buried pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2014;28:72–8. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.03.010>.
- [18] Klise KA, Bynum M, Moriarty D, Murray R. A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study. *Environmental Modelling & Software* 2017;95:420–31. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.022>.
- [19] Yoo DG, Kang D, Kim JH. Optimal design of water supply networks for enhancing seismic reliability. *Reliability Engineering & System Safety* 2016;146:79–88. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.10.001>.
- [20] Schwaller J, van Zyl JE, Kabaasha AM. Characterising the pressure-leakage response of pipe networks using the FAVAD equation. *Water Supply* 2015;15:1373–82. <https://doi.org/10.2166/ws.2015.101>.
- [21] Poulos A, de la Llera JC, Mitrani-Reiser J. Earthquake risk assessment of buildings accounting for human evacuation: EARTHQUAKE RISK ASSESSMENT OF BUILDINGS ACCOUNTING FOR EVACUATION. *Earthquake Engng Struct Dyn* 2017;46:561–83. <https://doi.org/10.1002/eqe.2803>.