

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA.
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA.

**DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE FUGAS EN REDES
DE AGUA POTABLE CON SUS RIESGOS ASOCIADOS**

**BORIS GÁRATE¹, DIEGO ABARCA², GERMÁN FERNÁNDEZ³, NITZA
MIRANDA⁴, YOLANDA ALBERTO⁵ Y YARKO NIÑO⁶**

RESUMEN.

En Chile, según el reporte de 2019 de la Superintendencia de Servicios Sanitarios, el porcentaje de agua no facturada representó un 32,9% del volumen de agua producida. Existen diversos procedimientos para hacer más eficiente las redes de agua potable y este trabajo profundiza en tres técnicas principales: i) detección y cuantificación de fugas usando *machine learning (SVM)*, donde se concluye que para obtener un modelo correcto y con predicciones adecuadas, es necesario poseer una gran cantidad de datos, demandas actualizadas y capacidad de cómputo; ii) identificación de elementos críticos de la red a través de una métrica topológica, la centralidad, para priorizar reparaciones que puedan devolver la disponibilidad del servicio y la presión normada a la red después de una pérdida; y iii) análisis de riesgo con base en amenazas naturales, donde a partir de curvas de probabilidad de ocurrencia de una amenaza, pueden identificarse métricas de desempeño de la red que puede verse afectada por estas amenazas y con ello, definir planes de emergencia o realizar estimaciones de necesidad de mejoras para prevenir daño en la red.

¹ Ingeniero Civil hidráulico e Investigador Proyecto RIPRA, CAPTA, Universidad de Chile – email: boris.garate.morales@gmail.com

² Estudiante de Magíster en Ingeniería Estructural, Sísmica y Geotécnica e Investigador Proyecto RIPRA, CAPTA, Universidad de Chile – email: diego.abarca.aguilar@gmail.com

³ Ingeniero Civil geotécnico e Investigador Proyecto RIPRA, CAPTA, Universidad de Chile – email: a.fernandez.fuenzalida@gmail.com

⁴ Ingeniera Civil hidráulica e Investigadora Proyecto RIPRA CAPTA, Universidad de Chile – email: nitza.miranda@ug.uchile.cl

⁵ Profesora Asistente, División de Estructura, Construcción y Geotecnia, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: yalberto@uchile.cl

⁶ Profesor Titular, División de Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Departamento de Ingeniería Civil, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile - email: ynino@ing.uchile.cl

1 INTRODUCCIÓN

Una de las mayores preocupaciones del último tiempo en los sistemas de distribución de agua potable ha sido minimizar las pérdidas de agua, con el fin de aumentar la eficiencia de la red y a la vez aumentar la seguridad hídrica, principalmente en periodos de escasez de recursos hídricos o bien cuando el suministro no alcanza a cubrir áreas de rápido crecimiento. En Chile, según el último informe de gestión emitido por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS, 2019), se reportó que para las 28 empresas sanitarias principales la diferencia entre el volumen de agua que ingresa al sistema pero que posteriormente no se factura, es de aproximadamente 590 millones de m³. Esto se denomina “agua no facturada” (ANF) y representó un 32,9% del volumen de agua producida. Dentro de este porcentaje se consideran las pérdidas físicas, que corresponde al volumen de agua que no llega al consumidor final por fallas en los sistemas de distribución.

Para garantizar un desempeño adecuado de la red se debe integrar un sistema de gestión para reducir las pérdidas. Con el propósito de obtener soluciones, este trabajo profundiza en técnicas como i) análisis topológico de la red, para conocer puntos críticos tanto operacionales como estructurales, ii) detección y cuantificación de fugas usando *machine learning* y iii) análisis de riesgo por amenazas naturales.

2 METODOLOGÍA

2.1 Metodología de identificación de fugas

Para este módulo, el objetivo principal es la utilización de un algoritmo de aprendizaje supervisado, como la SVM, para la detección y localización de fugas en parte de la red de agua de una ciudad grande de Chile. Support Vector Machine (SVM) es un algoritmo de aprendizaje supervisado y su funcionamiento se basa en la transformación no lineal de los datos de entrada X en un espacio Y de mayor dimensionalidad. En Y se construye un hiperplano que separa de manera óptima los datos de entrada X en diferentes clases. Esto se hace maximizando la distancia entre el hiperplano óptimo y el “borde” de cada clase. En cambio, las Redes Neuronales Artificiales son un grupo interconectado de neuronas, donde cada una está conectada a muchas otras, emulando así el funcionamiento de una red neuronal biológica. La arquitectura básica de una RNA consta de tres capas: una capa de entrada que recibe la información a procesar y realiza la primera evaluación de esta, una capa oculta que puede ser más de una si se requiere una arquitectura más compleja y una capa de salida (Guarda & Carrasco, 2017).

Para llevar a cabo esta técnica, primero se debe transformar el modelo hidráulico de la red de distribución -de un sector de una ciudad- de estado estático a estado dinámico. Luego, programar la máquina de vector de apoyo (SVM) para detectar fugas en redes de distribución de agua potable, aplicar la metodología propuesta a la red de distribución modelada en estado

dinámico y comparar la efectividad de la metodología propuesta para la red modelada con la obtenida por Kemba et al. (2017).

2.1.1 Modelo hidráulico dinámico en WaterGEMS

Se inicia con la transformación del modelo estático del sistema de distribución de parte de una ciudad de Chile a un modelo dinámico, basado en la información del caudal efluente de los estanques que abastecen el sector, se tiene información cada 15 minutos entre los años 2017 y 2019. Se utiliza el mes de agosto de los 3 años, ya que se tiene información de las presiones del sector de agosto del 2020. Se promedia el comportamiento de los días de semana para obtener un patrón de salida de caudal para los días de semana de agosto. Se realiza lo mismo para los días fines de semana (Figura 1).

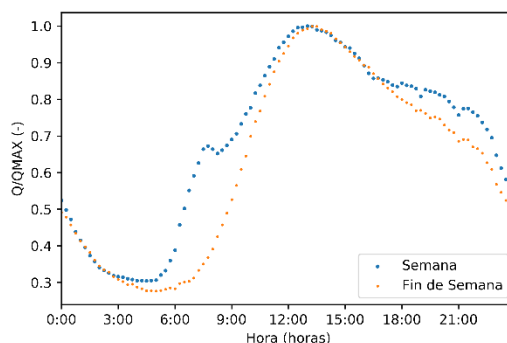


Figura 1. Patrones de consumo de la red del mes de agosto

Además del patrón de consumo, se obtiene el patrón diario de las válvulas reguladoras de presión existentes en el sistema de distribución. De igual forma que con el caudal, se normaliza la presión de los días de semana y fines de semana de agosto, obteniendo el patrón de las presiones a la salida de las válvulas reductoras

2.1.2 Calibración del modelo hidráulico dinámico.

Se utiliza información telemétrica de presión cada 15 minutos en diferentes puntos del sector (Figura 2). Con los datos de agosto del 2020 se evalúa la precisión de los datos que entrega el modelo. Con un rango de error de 3.5 m.c.a. (criterio utilizado por la empresa concesionaria) se obtiene una precisión del 57.57% para el modelo. Se realiza una calibración a nivel macro, utilizando diferentes patrones de consumo de agua para los edificios de la zona, además de programar el cierre de algunas válvulas reductoras de presión para las horas nocturnas, ya que la operación del sistema de distribución cambia durante la noche.

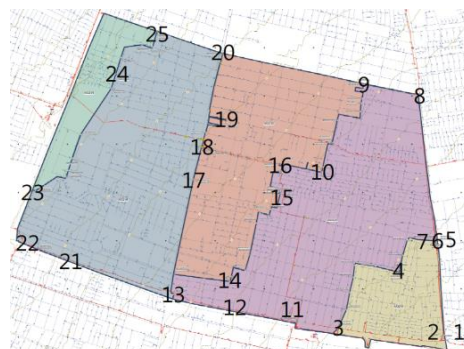


Figura 2. Puntos de medición telemétrica de presión.

Con el mismo criterio anterior se obtiene una precisión del 73.59% para las presiones de entrada y salida de todas las válvulas reductoras de presión.

Se hace un análisis de sensibilidad variando la presión de salida de la válvula reductora de presión de entrada al sistema y otro variando la demanda de caudal del sector, en ambos análisis se opta por mantener las condiciones iniciales, ya que el cambio modifica de gran manera el comportamiento hidráulico de la red.

2.1.3 Detección y localización de fugas utilizando una SVM

Se generan simulaciones con fuga basándose en el comportamiento de las semanas y los fines de semana de agosto del año 2019 (8 diferentes simulaciones). Se generan un total de 2.304

simulaciones con fugas y 1.296 simulaciones sin fuga. Teniendo un total de 3.600 simulaciones, las que se dividen en 2700 (75%) de entrenamiento y 900 (25%) de prueba.

Se ordenan los datos de salida del modelo para poder ingresar a la SVM. Para poder generar más de una SVM se ordenan los datos de tres formas.

En el primer y segundo ordenamiento, cada simulación será una matriz donde las filas corresponderán a la hora del día con un paso de 15 minutos y las columnas representarán los nodos existentes en la red de distribución. El primero contiene solo las columnas de los nodos y Pressure Reduction Valve (PRV) que cuentan con información telemétrica y el segundo con las columnas de los nodos y PVR con una buena distribución espacial en el modelo, como muestran la Figura 3, a y b respectivamente.



Figura 3. Puntos rojos indican la cantidad de columnas en el ordenamiento: a) Tipo 1 y b) Tipo 2

En ambas matrices, la última columna corresponde al elemento a ser clasificado con la SVM. Existen 17 clases del 0 al 16. La clase 0 corresponde a que no existe fuga a la hora de esa fila, la clase 1 corresponde a que existe fuga en la PRV ubicada en uno de los puntos rojos de la Figura 5.a) o b), dependiendo del ordenamiento que se utilice para crear la SVM. En el tercer ordenamiento (Ord 3), cada simulación será una matriz donde las filas corresponderán a los nodos existentes en la red de distribución y las columnas corresponden a la hora del día con un paso de 15 minutos. En este caso las clases son 7 (a las 0, 6, 8, 10, 14, 15 y 18), donde cada una representa si hay fuga o no en el nodo o PRV de la fila. El 0 nuevamente corresponde a la ausencia de fuga y en el resto de las clases el número corresponde a la hora a la que ocurre la fuga. En los tres ordenamientos las distintas simulaciones se agregan hacia abajo como filas quedando 3 matrices de distintas dimensiones.

Además de las SVM para estas 3 matrices, se crean otras 3 SVM con el promedio de la presión por nodo para cada una de las matrices ya creadas, por lo que, se tiene un total de 6 SVM con diferente comportamiento (Tabla 1).

Por último, se crea una última SVM para el primer ordenamiento. El que consta de transformar la matriz de cada escenario en una sola fila.

Tabla 1. Ordenamiento para las SVM.

Ord. 1.1	Ord 1
Ord. 1.2	Ord 1 con la presión promedio
Ord. 1.3	Ord 1 con escenario en una fila
Ord. 2.1	Ord 2
Ord. 2.2	Ord 2 con la presión promedio
Ord. 3.1	Ord 3
Ord. 3.2	Ord 3 con la presión promedio

2.2 Metodologías en común de análisis hidráulico de criticidad y de riesgo

2.2.1 Características topológicas de la red

Algunas técnicas empleadas en este estudio requieren conocer las características topológicas de la red de a evaluar, así como sus condiciones de funcionamiento. Las primeras se refieren

las características de las componentes y las relaciones entre ellas, y las segundas tienen que ver con la operación del análisis hidráulico.

Para el análisis hidráulico de criticidad y de riesgo por amenazas naturales, se utiliza el módulo de Python WNTR (Klise et al., 2017) para simular redes de distribución de agua basado en presiones (PDA), donde se considera que la demanda en los nodos de la red depende de la presión nodal y puede variar (Tabesh et al., 2011), lo que permite analizar la red considerando situaciones de baja de presión, como fugas en el sistema.

Para los análisis se utiliza una red de juguete generada aleatoriamente, cuyos nodos se encuentran sobre el manto de un cilindro. A los nodos se les asigna un patrón de demanda dado por multiplicadores de una demanda base que varían con el tiempo. Para surtir esta demanda, se designan fuentes correspondientes a reservorios que imponen presiones de 32 mca, como se aprecia en la Figura 4. Dado que se realiza un PDA, se considera que bajo una presión mínima (15 mca, indicados en la NCh 695 Of. 2015), la demanda que puede existir en un nodo se verá disminuida de acuerdo con su presión, siendo el límite una presión de 5 mca tras la cual la demanda será nula, como se observa en la Figura 5.

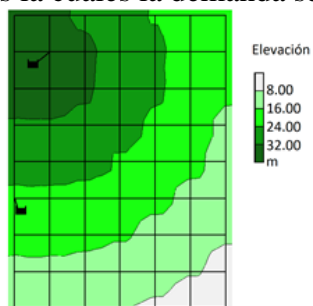


Figura 4. Altimetría de una red de ejemplo con 65 nodos -2 de ellos son reservorios- y 112 tuberías.

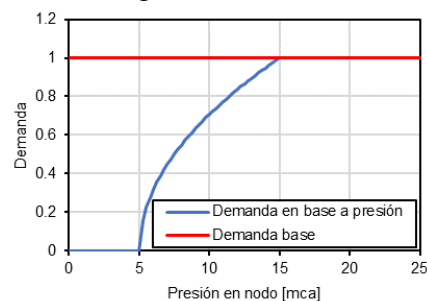


Figura 5. Demanda basada en presiones.

2.3 Análisis hidráulico de criticidad

Para determinar el orden de relevancia en términos de criticidad al interior de la red, primero se realiza un análisis topológico y luego, se simula el funcionamiento hidráulico normal de la red, estableciendo el comportamiento basal.

Luego, se establecen múltiples escenarios de daño generados de manera probabilística, con base en curvas de probabilidad de ocurrencia de diferentes medidas de intensidad de la amenaza y la probabilidad de daño en el sistema. Los escenarios de daño son simulados hidráulicamente, calculando las variaciones que se generan en las métricas de desempeño, como la demanda cubierta o un índice de cumplimiento a partir de sus valores basales. Se seleccionan los escenarios en que la red alcanza pérdidas de funcionalidad considerables y se establece una relación probabilística entre los elementos que fallan individualmente en dichos escenarios. Análogamente, se seleccionan los escenarios en que la red sostiene su nivel de funcionalidad, se relaciona de forma probabilística con los elementos que no fallan y la robustez de la red.

Las descripciones probabilísticas establecidas permiten establecer la prioridad de los elementos al interior de la red, y una simulación de los planes de reparación permite estimar la resiliencia de la red a través de los diferentes planes de reparación.

Finalmente, se realizan comparaciones cuantitativas de la resiliencia exhibida por la red en los múltiples casos de priorización a partir de la variación en el tiempo de diferentes métricas de resiliencia, ya sea con base en la caracterización topológica o en la criticidad de los elementos, considerando el comportamiento estadístico descriptivo calculado en el módulo.

Con esta técnica se busca evaluar la criticidad de los elementos de la red para adquirir herramientas de decisión en los planes de mantenimiento, expansión y reparación de redes de agua potable, con el fin de mejorar las condiciones de resiliencia de la red para disminuir las pérdidas asociadas a la manifestación de los efectos de múltiples amenazas naturales.

2.3.1 Metodología empleada

Para determinar el orden de relevancia, en cuanto a criticidad al interior de la red, se realiza un análisis topológico. El resultado de este permite identificar elementos más centrales o aquellos que al desconectarse, generan la mayor afectación al sistema. A partir de ello, es posible establecer un orden de prioridad no hidráulico (o topológico) que puede ser posteriormente contrastado con los resultados del análisis hidráulico. En segundo lugar, se simula el funcionamiento hidráulico normal de la red, considerando un método PDA y materializado empleando el paquete WNTR de la EPA. Esto permite analizar las condiciones basales de las métricas hidráulicas de disponibilidad de agua, presión satisfecha, grado entrópico e índice de Todini a través del tiempo, pudiendo desarrollarse un análisis dinámico de las variaciones que estas métricas presentan en condiciones de desastre.

A continuación, se establecen múltiples escenarios de daño generados de manera probabilística, considerando que un sismo ocurre a una distancia de 70 km de la red y a una profundidad de 1.5 km, magnitud momento de 8.5, además de presentar una réplica dos grados más baja. Con base en los modelos disponibles de amenaza se determina el valor de la PGA sobre cada elemento de la red (Poulos et al, 2018) y empleando los estudios de fragilidad disponibles (Garvs, 2020), se puede estimar el grado de daño de cada elemento. Los escenarios de daño se modelan a través de fugas nodales, que son proporcionales a la magnitud del daño y la cantidad de tuberías en estado de falla que se conectan a cada nodo. Cada estado es simulado hidráulicamente, empleando un método PDA a través del paquete WNTR, calculando las variaciones que se generan en las métricas de resiliencia a partir de los valores basales obtenidos previamente. Se seleccionan los escenarios en que la red alcanza pérdidas de funcionalidad considerables -mayores a un 15%- y se establece una relación probabilística entre los elementos que fallan individualmente en dichos escenarios y la probabilidad general de falla. Análogamente, se seleccionan los escenarios en que la red sostiene su nivel de funcionalidad y se establece una relación probabilística entre los elementos que no fallan y la robustez de la red (Fernández, 2021).

Las descripciones probabilísticas establecidas permiten cuantificar de forma relativa la prioridad de los elementos al interior de la red, considerando que un elemento crítico es aquel cuya falla se correlaciona con la falla de la red (indicador de vulnerabilidad) o cuya preservación se correlaciona con la preservación de funcionalidad de la red (indicador de robustez). Estos métodos de ordenamiento permiten desarrollar planes de reparación dirigidos según la prioridad asignada, obteniéndose un indicador de resiliencia para cada método empleado.

Finalmente, es posible realizar comparaciones cuantitativas de la resiliencia exhibida por la red en los múltiples casos de priorización a partir de la variación en el tiempo de diferentes

métricas de resiliencia, ya sea con base en la caracterización topológica, o en la caracterización de criticidad de los elementos, considerando el comportamiento estadístico descriptivo calculado en el módulo.

2.3.2 Actividades desarrolladas

Se realiza el análisis hidráulico completo de una red de pruebas (i.e., toy network) de 63 nodos distribuidos en torno a un punto de altura máxima, y cuya pendiente es, en forma radial, de 0.15. Patrones de demanda realistas son asociados a los nodos, para que el comportamiento de la red sea dinámico y responda a los ciclos diarios que toda red de agua potable presenta. A partir del análisis, se determina el comportamiento estadístico de las métricas hidráulicas de resiliencia con relación al estado de falla en la satisfacción del servicio frente a una amenaza de sismo, cuyo epicentro dista 70 km de la red y cuya magnitud de momento de 8.5 y posterior inundación (por un tsunami), que alcanza la zona de menor altura de la red. El mismo análisis ha sido realizado con una réplica de magnitud de momento de 6.5.

En seguida, se establece la relevancia del estado de falla o no falla de cada elemento en términos de la probabilidad que posee la red de fallar -o de no fallar, respectivamente- cuando cada elemento posee uno u otro comportamiento. A continuación, se generan planes de reparación de acuerdo con los principios de centralidad topológica, y a partir de los resultados del análisis hidráulico, generando la información necesaria para comparar diferentes métodos de priorización en el proceso de reparación de los elementos de la red.

Además, con el fin de evaluar la escalabilidad del proyecto, se realiza el análisis topológico de una de las sub-redes de distribución de agua potable de una comuna de Chile. El análisis abarca las métricas de centralidad de interposición y de cercanía, los puntos de articulación, los puentes y el grado nodal.

2.4 Análisis de riesgo de amenaza

Esta técnica busca mostrar que una red de agua potable se verá afectada negativamente ante la amenaza sísmica, considerando un análisis probabilístico, y que es posible cuantificar este impacto con base en métricas obtenidas al simular la red en su estado dañado.

2.4.1 Aplicación del módulo

El análisis sísmico se realiza generando pares de magnitudes y radios con simulaciones de Monte Carlo, en este caso utilizando datos históricos de Valparaíso. Estos pares se entregan a una GMPE, donde se obtienen valores como el PGA obtenido a partir de la GMPE de Idini et. al (2017). Para cada valor de PGA se determina cuál es la probabilidad de que se exceda este valor a partir del número de PGA de la muestra menores a este valor, y esta probabilidad se multiplica por la tasa de excedencia anual de sismos mayores al menor del análisis obtenido a partir de Gutenberg-Richter de la zona, lo que se traduce en tasas de excedencia de cada medida de intensidad. Esta metodología permite determinar una curva de amenaza (Figura 6), la que relaciona tasa de excedencia anual con las medidas de intensidad de cada escenario sísmico. Los escenarios sísmicos combinan con una curva de fragilidad, la que los asocia a una probabilidad de ocurrencia de un cierto estado de daño y permite determinar

cómo se dañan ciertos elementos de la red para cada escenario. La curva de fragilidad, que se ve en la Figura 7 es la desarrollada por Garvs (2020) para tuberías de asbesto-cemento, material que compone el 40.4% de los elementos de las redes de agua potable en Chile (SISS, 2018).

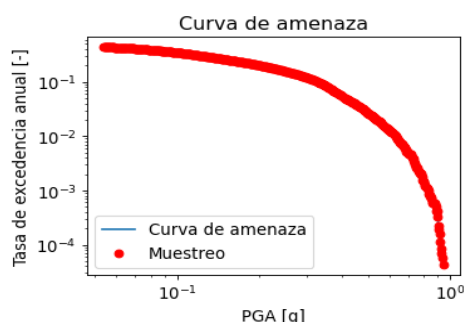


Figura 7. Curva de amenaza sísmica y muestreo

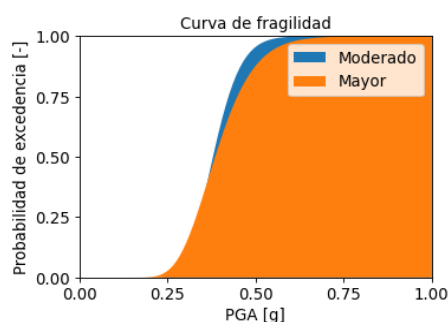


Figura 6. Curva de fragilidad (Garvs, 2020)

Cada uno de los puntos de la curva a evaluar se considerará un escenario de amenaza sísmica. Para cada escenario, se determina aleatoriamente qué tuberías presentarán fugas en base a la probabilidad de falla determinada, y se incluyen en el modelo como fugas de 0.001 cm de diámetro para el caso moderado y 0.005 cm para el caso mayor o severo. Las fugas actúan desde el tiempo de ocurrencia del sismo hasta 24 horas después.

Se simula hidráulicamente la red no dañada por 96 horas y se registran sus métricas, para luego hacer lo mismo para cada escenario de amenaza. Una vez realizadas las simulaciones de todos los escenarios, se calcula la variación entre las métricas hidráulicas, la que para cada escenario sísmico se relaciona con la tasa de excedencia del escenario. Se tienen métricas hidráulicas que serán la fracción de la red que supera la presión mínima normativa (presión requerida), la fracción de la red que supera la presión mínima posible (presión mínima), y la suma de cada cociente entre la demanda en un nodo por la demanda esperada en el mismo (disponibilidad de agua), métrica que se ve en la Figura 8. Además, se obtiene una métrica económica calculada según la cantidad de nodos en los que la presión promedio se encuentra bajo la presión mínima normativa, y cuánto menor es a ésta. El cálculo se realiza a partir de una regresión de datos de un procedimiento de multa realizado por la SISS en el año 2019 (Figura 9).

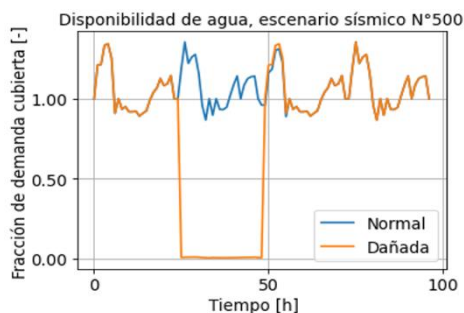


Figura 8. Efecto del escenario sísmico más desfavorable en la disponibilidad de agua de la red.

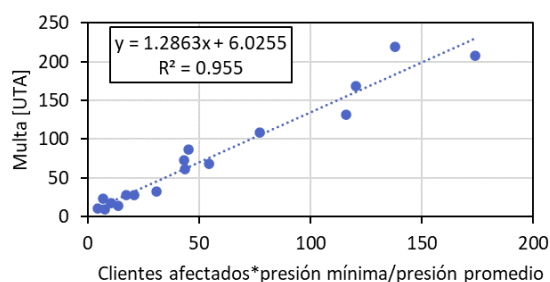


Figura 9. Regresión utilizada para determinar métrica económica en base a incumplimiento de presión mínima normativa.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados para la detección y localización de fugas

Solo se obtienen buenos resultados para las SVM de los ordenamientos 1.2 y 2.2, por lo que se trabaja solo con ellas. Los resultados se pueden ver en la matriz de confusión que es una herramienta que permite visualizar el desempeño de las SVM, donde cada columna de la matriz representa el número de predicciones de cada clase, mientras que cada fila representa la clase que predice el algoritmo. Si se tiene una diagonal y solo ceros, el resultado es perfecto y el algoritmo posee un buen desempeño. Cabe destacar que el resto de las métricas no se conciben con la matriz de confusión y los resultados tendrían a mejores eficiencias que las existentes, lo cual no puede ser, por lo que se escoge la matriz de confusión como el elemento visual que mejor representa los resultados, como se ve en la Figura 10. Para el procesamiento de las SVM se utiliza la infraestructura de supercómputo del NLHPC.

De ambas matrices se observa una gran cantidad de aciertos. Es posible que la SVM tenga un sobreajuste a los datos entregados. La matriz tiene gran cantidad de clases con 100% de verdaderos positivos. Se corre nuevamente la SVM con diferentes C para ambos casos. Al disminuir el C se obtiene una disminución de verdaderos positivos.

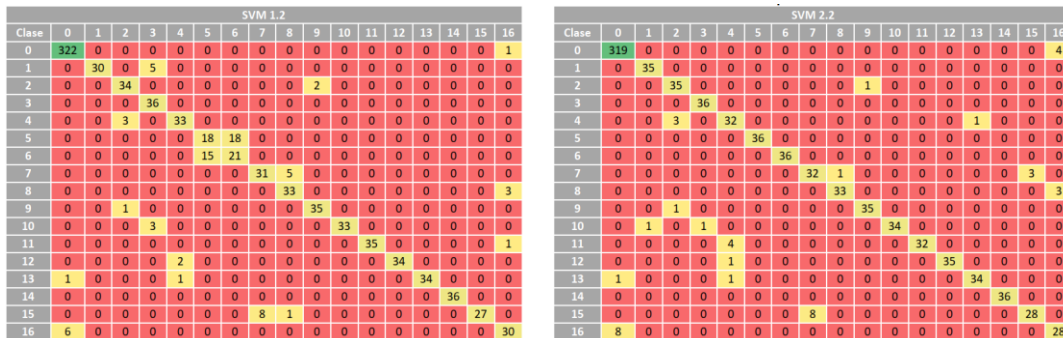


Figura 10. Matrices de confusión de los SVM con datos de prueba.

3.2 Resultados para análisis hidráulico

El análisis de criticidad presenta claros patrones de condicionamiento de falla de la red a partir de la falla de ciertos elementos en términos de disminución de la presión requerida y de la disponibilidad de agua, como se ve en la Figura 11.

Por otro lado, se observa que las métricas de resiliencia poseen variaciones que se pueden modelar de manera descriptiva. Algunas de ellas, presentando distribuciones modelables que permiten predecir la disminución de dichas métricas, en un determinado factor, para un cierto

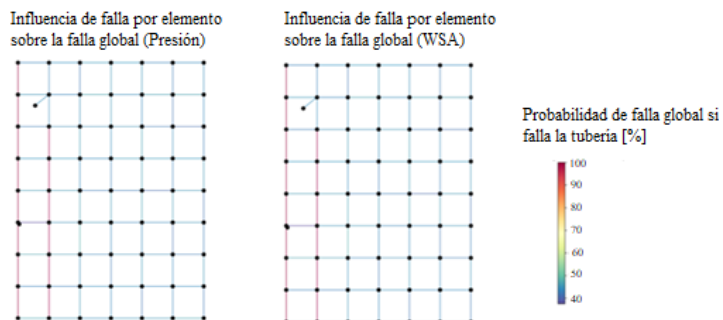


Figura 11. Índice probabilístico de condicionamiento de falla en términos de presión mínima (izquierda) y disponibilidad del servicio de distribución (derecha).

período de retorno como se ve en la Figura 12.

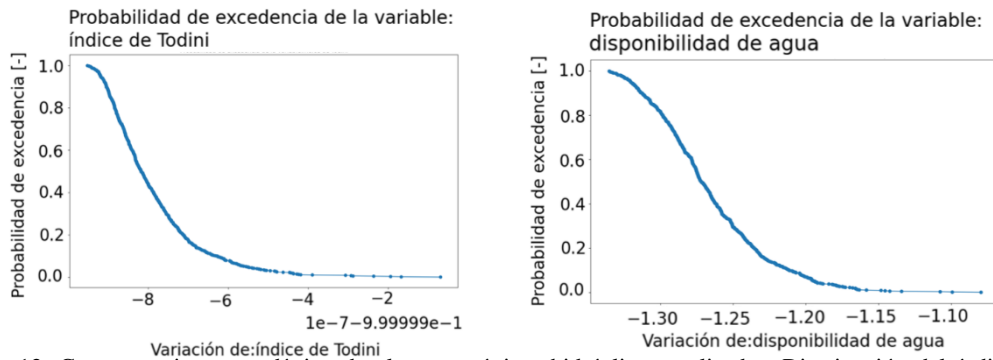


Figura 12. Comportamiento estadístico de algunas métricas hidráulicas analizadas. Disminución del índice de redundancia de Todini (izquierda) y disminución de la disponibilidad del servicio de agua potable (derecha).

En el análisis de recuperación, se emplean diversos métodos para comparar el comportamiento de las métricas en tiempo a raíz de los diferentes métodos de selección de criticidad, y las comparaciones de efectividad son realizadas a través del cálculo numérico de la resiliencia exhibida en cada comportamiento, ver Figura 13.

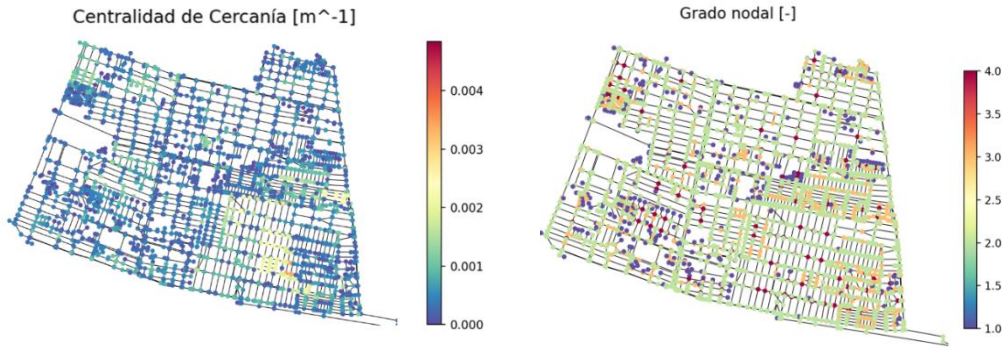


Figura 13. Análisis topológico de la sub-red de distribución de agua potable de una comuna de una gran ciudad de Chile. Centralidad de cercanía (izquierda) y grado nodal (derecha).

Finalmente, se presentan algunas referencias de los análisis topológicos realizados en la sub-red de distribución de agua potable asociada a una comuna de una gran ciudad de Chile, ver Figura 14.

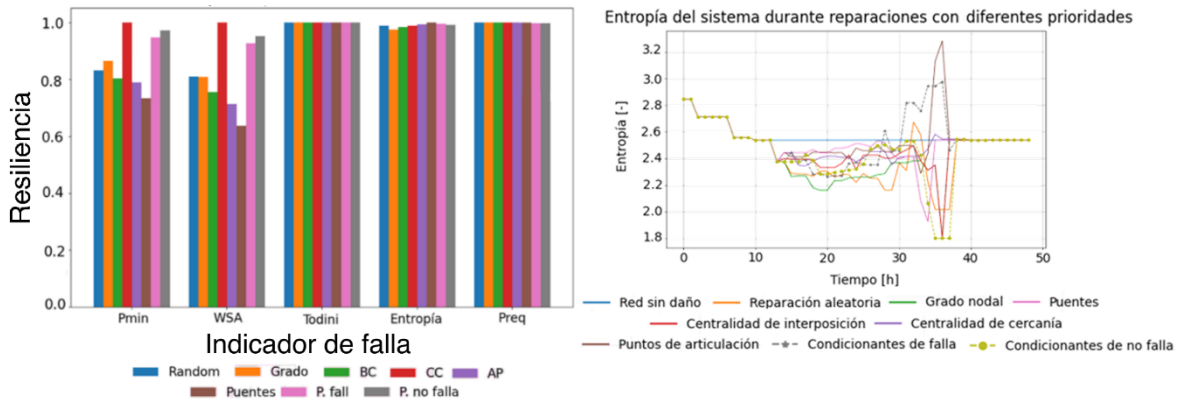


Figura 14. Proceso de reparación de la red empleando diferentes métricas para la determinación de criticidad. Resiliencia observada (izquierda) y comportamiento temporal de la métrica hidráulica disponibilidad del servicio de agua (derecha).

3.3 Resultados obtenidos para eventos de amenaza

En las Figuras 15 y 16, se presentan la situación de daño de la red un escenario sísmico junto a un mapa indicativo de los nodos de la red, que en promedio no logran cumplir con la presión mínima normativa debido al efecto del escenario sísmico más desfavorable.

Red dañada, escenario sísmico N°350

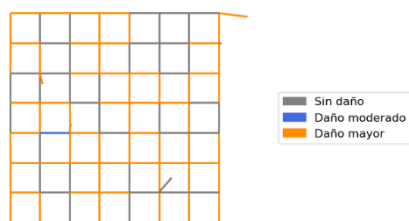


Figura 15. Daño en red para un escenario intermedio.

Nodos que no cumplen con Pmin, escenario sísmico N°500

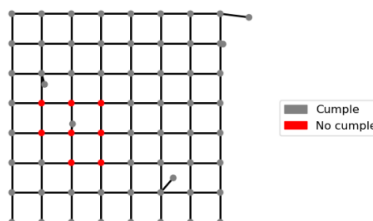


Figura 16. Incumplimiento de presión mínima normativa, escenario más desfavorable.

En las Figuras 17 y 18, se presentan las curvas de tasa de excedencia anual dos de las métricas, donde los puntos rojos corresponden a los escenarios de los cuales se mostraron los mapas de daño anteriormente. Existe un cierto valor de PGA desde el cual la red completa tiene probabilidad 1 de fallar, por lo que desde la tasa de excedencia anual a este valor las métricas en ambas curvas dejan de aumentar.

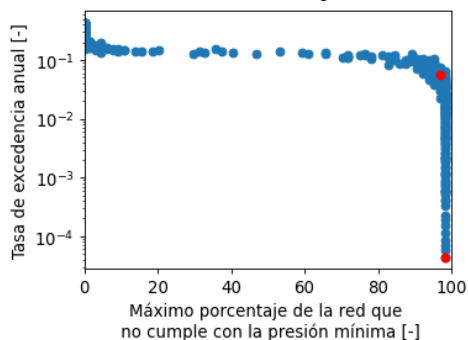


Figura 17. Tasa anual de excedencia de máximo porcentaje de la red que no cumple con la presión mínima normativa.

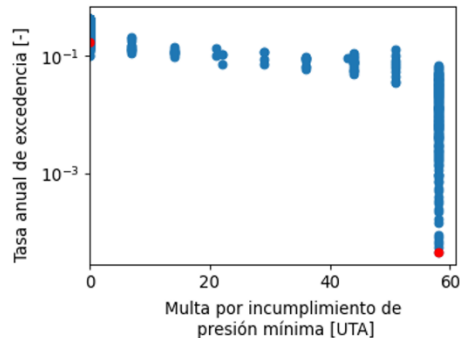


Figura 18. Tasa anual de excedencia de valores de multa por incumplimiento de presión mínima.

4 CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones y recomendaciones principales del desarrollo de cada técnica del presente trabajo.

4.1 Identificación de fugas

La metodología utilizada si bien toma bastante tiempo, tanto en la modelación hidráulica, como en la generación de datos y en el procesamiento de la SVM, se logran obtener buenos resultados finales para las SVM 1.2 y 2.2.

Para obtener un modelo con fines operacionales o de diseño es necesaria una gran cantidad de datos de la red, que no siempre están informados a la SISS o no son recabados por la empresa concesionaria. Por otro lado, el no poder obtener una calibración con una presión

mayor al 73 % se debe a que no se tiene información de la distribución diaria de la demanda diferenciada en el sector.

En el estudio se generaron simulaciones de 48 fugas diferentes en 6 horarios diferentes, pero para que la SVM pueda responder bien ante a una fuga en cualquier zona del sector modelado, es necesario crear una fuga en cada nodo, a cada horario diferente, lo que generaría un gran número de escenarios, lo que aumentaría el tiempo de extracción y procesamiento de datos.

Para la SVM 1.2 y 2.2 en el punto anterior, se comenta sobre el reentrenamiento de la SVM con diferentes C, donde de un acierto en la detección y localización de la fuga de alrededor del 90% debido al sobreajuste existente por el C de 30.000, se pasa a un acierto en la localización y detección de alrededor del 50% para la SVM 1.2 con un C de 10.000. Y para la SVM 2.2 pasa aproximadamente del mismo 90% a un 65% con un C de 1.000 y a un 80% con un C de 10.000. Por lo que, para el correcto funcionamiento de la detección y localización, tratando de evitar el sobreajuste, se recomienda la utilización de un C de 15.000 o 20.000 para la segunda SVM y uno de 5.000 para la quinta SVM

Por último, la continuación del estudio permite cuantificar las fugas con la misma metodología, creando más clases que representen diferentes caudales de fuga.

4.2 Análisis hidráulico de criticidad

Los resultados de esta técnica muestran que la priorización en las diferentes decisiones de operación, mantención o reparación está directamente relacionada con los fines específicos de cada red de distribución y que permite realizar optimizaciones según los intereses puntuales de cada sistema en escenarios de daño particulares. Esto, debido a que un determinado método de priorización puede generar reparaciones óptimas en términos de redundancia energética, mientras que un método diferente de priorización puede ser óptimo para devolver lo más rápido posible la disponibilidad de agua a sus valores normales tras el impacto de algún evento de amenaza. En la red de pruebas analizada, se establece que los mejores indicadores para devolver a la red la disponibilidad del servicio de agua y la presión mínima, son los de criticidad asociados a la centralidad de cercanía (métrica topológica) seguida por los indicadores probabilísticos propuestos con esta técnica (modelo hidráulico).

Por otro lado, se comprueba que el método es escalable en el análisis de criticidad y que los análisis aplicados a redes de grandes dimensiones son factibles a partir de lo desarrollado, por lo que se espera que el método pueda ser aplicado sobre redes completas reales, cuyas amenazas asociadas sean modeladas de forma individual y cuyas interacciones sean desarrollados en el área del estudio de riesgo en el corto y mediano plazo.

4.3 Análisis de riesgo

El análisis de riesgo se podría realizar de forma similar con otros tipos de amenaza, ya sea inundación, incendio o deterioro, y también podría aplicarse a redes reales. El análisis se podría incluso extender a un enfoque multiamenaza, donde distintas amenazas afectan a la red simultáneamente, tales como el deterioro de las tuberías y el caso sísmico.

Los resultados de curvas de tasa de excedencia anual de las distintas métricas permiten realizar estimaciones de necesidad de reparación de las redes o son herramientas para definir planes de emergencia. Se podría analizar otras métricas que debiesen variar con los cambios en la red, como la entropía, y también se podría extender el análisis económico si se considerara un costo de reparación y/o mantenimiento en base a los daños que sufriría la red.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por Centro Avanzado para Tecnologías del Agua y la colaboración de la infraestructura de supercómputo del NLHPC en la preparación de este artículo.

REFERENCIAS

Chan, T. K., Chin, C. S., & Zhong, X. (2018). Review of current technologies and proposed intelligent methodologies for water distributed network leakage detection. *IEEE Access*, 6, 78846-78867.

Fernández, G. (2021). Diseño de una metodología general para la identificación de elementos críticos en una red de distribución de agua potable. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Garvs, I. (2020). Desarrollo de curvas de fragilidad para sistemas de distribución de agua en Chile. Universidad de Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Grigg, N. S. (2003). Water Utility Security: Multiple Hazards and Multiple Barriers. *Journal of Infrastructure Systems*, 9(2), 81–88. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2003\)9:2\(81\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2003)9:2(81))

Guarda, L., & Carrasco, J. (2017). Comparación entre SVM y RNA para clasificación de sujetos con ojos abiertos o cerrados mediante EEG. *Departamento de Ingeniería Mecánica*, 1-4.

Idini, Benjamín & Rojas, Fabián & Ruiz, Sergio & Pasten, Cesar. (2017). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 15. 1853–1880. 10.1007/s10518-016-0050-1.

Kemba, J., Gideon, K., & Nyirenda, C. N. (2017, May). Leakage detection in Tsumeb east water distribution network using EPANET and support vector regression. In 2017 IST-Africa Week Conference (IST-Africa) (pp.1-8). IEEE.

Klise, K. A., Hart, D., Moriarty, D., Bynum, M. L., Murray, R., Burkhardt, J., & Haxton, T. (2017). Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual. United State Environmental Protection Agency. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=532528&Lab=NHSRC

Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., & de la Llera, J. C. (2018). An updated recurrence model for Chilean subduction seismicity and statistical validation of its poisson nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*.

Orden N° 3287 de la SISS del 5 de septiembre del 2018. URL: <https://www.camara.cl/pdf.aspx?prmTIPO=OFICIOFISCALIZACIONRESPUESTA&prmID=69596&prmNUMERO=3287&prmRTE=474>

SISS, S. D. S. S. (2019). Informe de gestión del sector sanitario 2019. SISS. Santiago

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

