

Análisis estadístico de factibilidad para sistemas automáticos de localización de fugas mediante sensores de presión

Neto, F.M.^{a,*}, Manzano, J.M.^b, Orihuela, L.^{a,c}

^aCentro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad, Universidad de Huelva, 21819, Huelva, Spain

^bDept. Ingeniería, Universidad Loyola Andalucía, 41704, Dos Hermanas, Spain

^cDept. Ingeniería Electrónica, Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva, 21007, Huelva, Spain

To cite this article: Neto, F.M., Manzano, J.M., Orihuela, L. 2025. Heuristic feasibility analysis for automatic leak location systems using pressure sensors. XX Simposio CEA de Control Inteligente, Huelva (Spain).

Resumen

Este trabajo analiza la factibilidad del problema de localización de fugas en redes hidráulicas basados en datos de presión. Se comparan redes de agua potable (malladas) y de riego (jerárquicas) ante la aplicación de ruido uniforme y gaussiano. Se generan firmas de fuga mediante EPANET y se aplican técnicas de agrupamiento y simulación Monte Carlo para estudiar el solapamiento entre regiones. Se propone una métrica probabilística de indistinguibilidad que cuantifica la ambigüedad en la detección. Los resultados muestran que las redes jerárquicas presentan mayor vulnerabilidad al ruido, con regiones altamente ambiguas incluso bajo niveles pequeños de perturbación. El histograma de solapamientos revela diferencias estructurales entre redes y permite clasificar su robustez. Se sugiere que fragmentar redes extensas en subregiones independientes puede mitigar el solapamiento y mejorar la discriminabilidad bajo incertidumbre.

Palabras clave: Redes de riego, Red de distribución, Localización de fugas, Factibilidad, Sensores de presión, EPANET

Heuristic feasibility analysis for automatic leak detection and location systems using pressure sensors

Abstract

This work analyzes the feasibility of locating leaks in hydraulic networks under measurement uncertainty using simulated pressure. Potable water (meshed) and irrigation (hierarchical) networks are compared under uniform and Gaussian noise. Leak signatures are generated using EPANET, and clustering and Monte Carlo methods are applied to study the overlap of response regions. A probabilistic indistinguishability metric is proposed to quantify ambiguity. Results show that hierarchical networks are more vulnerable to noise, with highly ambiguous regions even under low perturbation levels. The overlap histogram reveals structural differences between networks and enables classification of their diagnostic robustness. It is suggested that fragmenting large networks into independent sub-regions can mitigate overlap and improve discriminability under uncertainty

Keywords: Irrigation networks, Water distribution networks, Leak location, Feasibility, Pressure sensor, EPANET

1. Introducción

La disponibilidad de recursos hídricos para la agricultura se encuentra bajo una presión creciente. El aumento global de temperaturas y la alteración de los patrones de precipitación está reduciendo considerablemente la disponibilidad de agua en regiones vulnerables, como el sur de España, donde se han documentado descensos en la frecuencia e intensidad de las lluvias, (Lamo de Espinosa, 2024). Esta situación exige, entre otros as-

pectos, una gestión más eficiente de las redes hidráulicas. De forma concreta, las fugas representan no solo una pérdida de recurso, sino también un aumento significativo en los costes operativos debido al consumo energético necesario para mantener la presión en la red (Reis et al., 2023).

La investigación ha avanzado significativamente en el desarrollo de herramientas automáticas basadas en modelos hidráulicos y sensores de presión/caudal (Farah and Shahrour,

2024). No obstante, la mayor parte de estos avances se ha enfocado casi exclusivamente en redes de distribución de agua potable (WDNs o *Water Distribution Networks*), con escasa representación de redes de riego (INs o *Irrigation Networks*) en la literatura científica (Romero-Ben et al., 2023). Este desequilibrio es relevante, ya que las redes agrícolas presentan diferencias estructurales y operativas importantes respecto a las urbanas: topologías jerárquicas sin bucles, regímenes de operación por turnos, presiones variables, y restricciones técnicas como válvulas reductoras de presión (Neto et al., 2025).

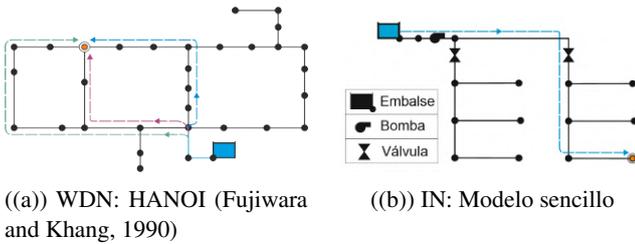


Figura 1: Tipos de estructuras y topologías en redes de agua.

Diversos estudios recientes clasifican las técnicas de detección y localización en tres grupos (ver Romero-Ben et al. (2023) para más detalles): métodos basados en modelos hidráulicos, enfoques híbridos o impulsados por datos, y métodos puramente basados en datos, los cuales procesan información proveniente de sensores distribuidos en la red. Sin embargo, la aplicación directa de muchas de estas metodologías a redes de riego ha arrojado resultados muy poco prometedores, tal y como ilustra el trabajo previo de los autores (Neto et al., 2025).

El presente trabajo trata de esclarecer el bajo rendimiento que arrojan los métodos de detección y localización de fugas existentes en la literatura cuando se aplican a redes de riego. En concreto, se propone un análisis de factibilidad del problema cuando la solución de éste se deriva del análisis de datos de presión. De forma resumida, puede decirse que las metodologías publicadas en los citados documentos se basan en la disimilitud entre los valores de presión que se observan antes y después de fugas.

El análisis que aquí se propone asume que el problema de detección de fugas es factible si el vector de presiones en el escenario sin fuga difiere, aunque sea mínimamente, del vector de presiones en el escenario con fuga. Este análisis, totalmente novedoso incluso en WDN, establece unos límites de operación a cualquier método de detección y localización de fugas y, por tanto, un *benchmark* sobre el que los métodos pueden compararse. El análisis se basa en las siguientes hipótesis:

- Para obtener los valores de presión en los escenarios con y sin fuga se hace uso de EPANET (Rossman and Zyl, 2010), que es, con mucha diferencia, la herramienta más usada en la literatura. Permite, entre otros, generar escenarios de fugas con diferentes características y en diferentes localizaciones.
- Se asume que los sensores de presión están sujetos a ruido, tanto uniforme como gaussiano.

Como se argumenta en este documento, el problema de factibilidad no puede analizarse de forma analítica. Se propone, por tanto, un análisis estadístico basado en herramientas de

clustering y de Monte Carlo para abordarlo. Este análisis permite concluir que en las INs, el problema de detección y localización de fugas pierde la factibilidad en condiciones de ruido mucho más suaves que en las WDNs. Es importante señalar que este trabajo no compara o analiza ningún método concreto de detección y localización sino que, como se ha dicho, establece límites de factibilidad a éstos.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 describe el problema y las características topológicas de los modelos de red utilizados. En la Sección 3 se presenta el desarrollo formal de la metodología propuesta, incluyendo la simulación hidráulica, la generación de ruido y el criterio de agrupación. La Sección 4 muestra los resultados comparativos entre redes bajo distintos tipos de ruido, y finalmente, en la Sección 6 se resumen las conclusiones y líneas futuras.

2. Definición del problema

Este trabajo parte de un problema teórico central: a medida que aumenta el nivel de ruido de los sensores de presión, las regiones en el espacio de presiones asociadas a distintas fugas comienzan a solaparse. Esta superposición genera ambigüedad, ya que diferentes fugas pueden producir respuestas de presión indistinguibles. En este contexto, el ruido se modela como una región de incertidumbre alrededor de cada firma hidráulica o vector de presión medido, cuya forma (hipercubo o hiperesfera) y tamaño dependen del tipo de ruido (uniforme o gaussiano) y de su intensidad.

Para abordar esta cuestión, se plantea un enfoque en dos etapas complementarias. En primer lugar, se cuantifica la denominada **robustez estructural** frente al ruido evaluando cómo disminuye el número de regiones distinguibles (clústeres) a medida que aumenta la incertidumbre. Esto refleja la pérdida de resolución espacial en la detección de eventos anómalos. En segundo lugar, se introduce el concepto de **indistinguibilidad** como una medida probabilística del grado de ambigüedad dentro de cada *cluster*, estimada mediante técnicas de Monte Carlo. Esta métrica evalúa la probabilidad de que una muestra de presión generada bajo ruido pueda ser atribuida a más de una firma hidráulica, y por tanto, a más de una posible localización de fuga. Finalmente, se trata de responder a la siguiente pregunta: **¿Es factible detectar y localizar una fuga bajo la presencia de ruido de medida en redes de agua potable y de riego?**

2.1. Redes utilizadas en el análisis

Se han seleccionado diferentes ejemplos representativos de las dos grandes tipologías redes hidráulicas: redes de distribución de agua potable (WDN), caracterizadas por estructuras malladas con alta redundancia hidráulica, Figura 1(a); y redes de riego presurizadas, de naturaleza jerárquica y flujo unidireccional desde una fuente principal hacia múltiples ramificaciones, comúnmente utilizadas en entornos agrícolas, Figura 1(b).

Esta distinción estructural permite analizar cómo la topología de la red influye en la capacidad de discriminación ante ruidos, aspecto clave para la posterior localización de fugas (Cholewa et al., 2024). La Tabla 1 presenta un análisis topológico comparativo de las redes consideradas (ver Figura ??), destacando el número de lazos, tuberías y la distribución de nodos en función de su conectividad. Se distinguen nodos terminales

Tabla 1: Resumen topológico de las redes y clasificación de nodos por conectividad

Red	Tipo	Lazos	Tuberías	Nodos	Intermedios	Terminales	Interconectados
COVADONGA	Riego (jer.)	0	96	97	22 (23 %)	40 (41 %)	35 (36 %)
HANOI	WDN (mall.)	3	33	31	23 (74 %)	2 (7 %)	6 (19 %)
D-TOWN	WDN (mall.)	475	873	399	75 (19 %)	0 (0 %)	324 (81 %)
NET3	WDN (mall.)	23	114	92	30 (33 %)	11 (12 %)	51 (55 %)
RURAL	Riego (mixta)	96	472	379	116 (31 %)	66 (17 %)	253 (52 %)

(conexión a una sola tubería), intermedios (dos conexiones) y redundantes (más de dos conexiones).

- **NET3.** Modelo de red de distribución de agua incluido como ejemplo en el software EPANET, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Esta red es ampliamente utilizada con fines educativos, de investigación y para probar algoritmos de análisis hidráulico (Ormsbee et al., 2022; Marzola et al., 2022).

- **HANOI.** Modelo de referencia clásico para estudios de optimización y análisis hidráulico de redes malladas (Fujiwara and Khang, 1990). Representa una red de distribución de agua por gravedad inspirada en la ciudad de Hanoi. Su estructura simple pero representativa, Figura 1(a), la convierte en un estándar ampliamente utilizado en la bibliografía (Boztaş and Firat, 2024).

- **D-TOWN.** Modelo sintético desarrollado en EPANET que representa una ciudad de tamaño medio. Aunque de estructura general mallada y con cierta redundancia hidráulica, algunas secciones presentan configuraciones jerárquicas (Marchi et al., 2014).

- **RURAL.** Modelo hidráulico de una red presurizada real basada en un sistema de distribución de agua de riego, similar a una comunidad de regantes (Marchi et al., 2014; Du et al., 2023).

- **COVADONGA.** Modelo hidráulico real de una red de riego presurizada organizada en una estructura completamente jerárquica, instalada en una explotación citrícola en Huelva, de 125 hectáreas. Su dotación de agua es de 350.000 m³/año, con un caudal nominal de 690 m³/h, equivalente a 6,2 m³/h.ha.

2.2. Simulación hidráulica de firmas de presión

Las simulaciones hidráulicas se realizaron utilizando las capacidades de EPANET y las funciones del EPANET MATLAB Toolkit (Vegas Niño et al., 2017). Este toolkit permite invocar desde MATLAB las funciones de EPANET para obtener presiones en nodos, caudales en tuberías, curvas de rendimiento de bombas o simulaciones de fugas (Casillas et al., 2014).

Se selecciona un subconjunto de nodos $N_f \subseteq N$ del total de nodos N , y se simulan fugas en estos. Una fuga se modela como una emisión de agua proporcional a la raíz de la presión (teorema de Torricelli). La constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de fuga, que se asume que toma un valor dentro de un conjunto discreto C .

En este estudio, se ha asumido como criterio de análisis que todos los nodos válidos de la red actúan simultáneamente como sensores de presión, es decir, $S = N_f$. Esta decisión permite una comparación homogénea entre redes de distinta topología y tamaño, evitando que el posicionamiento arbitrario de sensores condicione la calidad de las firmas generadas. Así, para cada

nodo con fuga $n \in N_f$ y para cada valor de coeficiente de fuga $c \in C$, se ejecuta una simulación hidráulica mediante EPANET, obteniendo la presión en todos los nodos sensores S :

$$P(n, c) = \{p(n, c, s) : \forall s \in S\} \in \mathbb{R}^{|S|}, \quad (1)$$

donde $|\cdot|$ denota la cardinalidad del conjunto. La presión de referencia (sin fugas) se denota como $P_{\text{ref}} \in \mathbb{R}^{|S|}$. Por tanto, la firma hidráulica inducida por una fuga se define como:

$$\Delta P(n, c) = P(n, c) - P_{\text{ref}}. \quad (2)$$

El conjunto total de firmas generadas para una red es:

$$\mathcal{F} = \{\Delta P(n, c) : n \in N_f, c \in C\}. \quad (3)$$

2.3. Ruido aplicado como región de incertidumbre

Para representar la incertidumbre en las firmas hidráulicas, se consideran dos modelos de ruido que generan regiones de dispersión geométrica distintas en el espacio de presiones:

- **Ruido uniforme.** Para cada firma $\Delta P(n, c) \in \mathbb{R}^{|S|}$, se genera un vector con ruido $\widetilde{\Delta P}(n, c)$ sumando ruido uniforme componente a componente:

$$\widetilde{\Delta P}(n, c) = \Delta P(n, c) + \epsilon, \quad (4)$$

siendo $\epsilon = \{\epsilon_i : \epsilon_i \sim \mathcal{U}(-\delta, \delta)\} \in \mathbb{R}^{|S|}$, y δ el parámetro que mide la intensidad del ruido. Como el ruido se considera independiente para cada sensor, se genera región de incertidumbre en forma de **hipercubo** en un espacio $|S|$ -dimensional (Figura 2) que puede definirse según:

$$\mathcal{H}_\delta(n, c) = \{z \in \mathbb{R}^{|S|} : |z_i - \Delta P_i(n, c)| \leq \delta, i = \{1, \dots, |S|\}\}. \quad (5)$$

Nótese que cada una de las firmas hidráulicas en \mathcal{F} genera un hipercono diferente en el mismo espacio $|S|$ -dimensional.

- **Ruido gaussiano.** Alternativamente, se considera un vector de ruido gaussiano de forma que:

$$\widetilde{\Delta P}(n, c) = \Delta P(n, c) + \eta, \quad \eta_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2), \quad (6)$$

siendo $\eta = \{\eta_i : \eta_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)\}$ en $\mathbb{R}^{|S|}$ y σ el parámetro que mide la intensidad del ruido. Asumiendo de nuevo independencia del ruido por cada sensor de presión, se genera ahora una **hiperesfera estadística** centrada en $\Delta P(n, c)$, cuya densidad decrece radialmente desde el centro (Figura 2). La mayor parte de la densidad de probabilidad (aproximadamente el 95 %) se concentra dentro de una hiperesfera de radio $r \approx 2\sigma$, correspondiente a la región donde se generan la mayoría de las muestras en el modelo de ruido gaussiano.

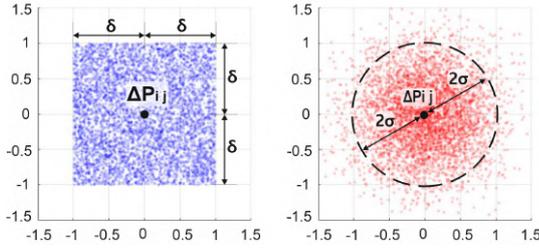


Figura 2: Regiones de incertidumbre en 2D: (izquierda) Hiper-cubo con ruido uniforme; (derecha) Hiperesfera estadística con ruido gaussiano.

3. Análisis de factibilidad

La factibilidad de localización de fugas puede evaluarse mediante una métrica geométrica definida como el cociente entre el volumen de intersección y el volumen total de las regiones (ej., $\frac{\text{Volumen intersección}}{\text{Volumen total}}$). De esta forma, si el volumen de intersección tiende a cero, cualquier fuga podrá ser distinguible; o, dicho de otro modo, se podría diseñar un método de detección y localización para distinguir el nodo de fuga n y el coeficiente de fuga c .

La complejidad de la geometría en espacios de alta dimensión y la naturaleza irregular del solapamiento hace que este problema no pueda resolverse desde el punto de vista analítico. Esta complejidad queda patente, para el caso de ruido uniforme, en la Figura 3. Hallar el volumen solapado y el volumen total es un problema sin solución analítica que requiere de un enfoque diferente: 1) **probabilístico**, que conllevaría hallar la probabilidad de intersección de las regiones, teniendo en cuenta solapamientos múltiples; 2) **algorítmico**, que requeriría recorrer todas las regiones e ir contando y descontando regiones con solapamientos sencillos y múltiples; 3) o **estadístico**, como el que se propone en este trabajo.

El enfoque algorítmico, que sí permitiría hallar la solución exacta, es de muy alta complejidad computacional, sobre todo cuando la dimensión del espacio crece y las regiones no son cuadradas, ya que el volumen solpado se debería medir con integrales de volumen.

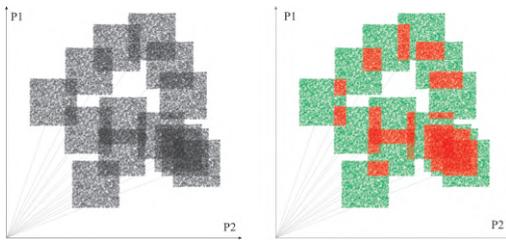


Figura 3: Ejemplo ilustrativo 2D del solapamiento entre regiones de incertidumbre generadas por ruido uniforme. En tonos oscuros (rojos) regiones indistinguibles por solapamiento entre hipercubos, y en tonos claros (verdes) las partes exclusivas de cada firma y que podrían discriminarse.

En este trabajo se propone un enfoque basado en análisis de Monte Carlo, que permite estimar de forma aproximada la indistinguibilidad en cada escenario. En la Figura 4 se describe la metodología y las dos etapas del análisis de factibilidad:

- La primera etapa consiste en la agrupación en *clústeres* de firmas hidráulicas parcialmente solapadas. En esos casos, la capacidad de discriminación se ve parcialmente comprometida, aunque no anulada (Sección 3.1). Esta fase es clave para reducir el tiempo de cómputo de la segunda fase.
- La segunda etapa estima *la probabilidad de indistinguibilidad*, es decir, de que un vector de presión pueda ser atribuido a múltiples firmas, cuantificando así la ambigüedad real introducida por el ruido (Sección 3.2).

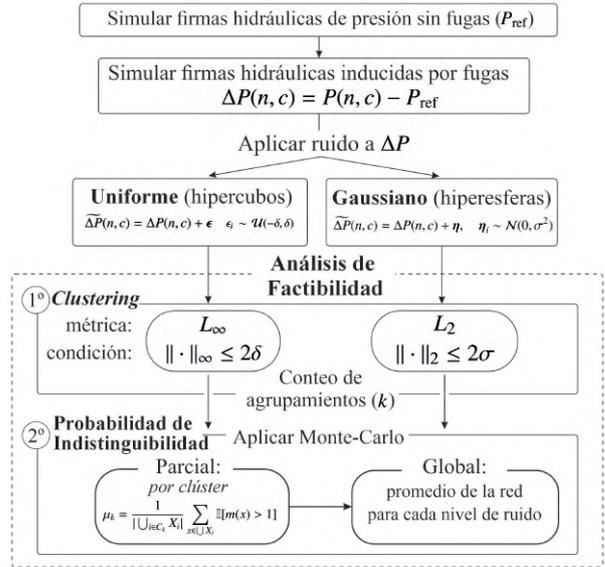


Figura 4: Diagrama de flujo del procedimiento global.

3.1. Criterios de agrupación con ruido uniforme y gaussiano

Tal y como recoge la Tabla 2 para cada tipo de ruido se define una región de incertidumbre alrededor de cada firma $\Delta P \in \mathbb{R}^d$, y se agrupan aquellas cuyas regiones que se solapan según una métrica específica. Es fácil ver que el solape de hipercubos (hiperesferas) se establece cuando la norma L_∞ (L_2) entre los centros de las regiones no supera 2δ (2σ).

Tabla 2: Criterios de agrupación por modelo de ruido

Característica	Ruido uniforme	Ruido gaussiano
Modelo de ruido	$\mathcal{U}(-\delta, \delta)$	$\mathcal{N}(0, \sigma^2)$
Región de incertidumbre	Hipercubo	Hiperesfera estadística
Métrica usada	L_∞	L_2
Condición de agrupación	$\ \cdot\ _\infty \leq 2\delta$	$\ \cdot\ _2 \leq 2\sigma$

El número de clústeres detectados para un nivel dado de ruido refleja una primera aproximación de la capacidad de discriminación con ruido. Como para cada nodo con fuga se consideran múltiples coeficientes de fuga, el número máximo de firmas generadas —y, en ausencia de ruido, el número máximo de clústeres— es igual a $N_{\text{clústeres}}^{\text{máx}} = |N_f| \times |C|$. A medida que δ o σ aumentan se reduce el número de clústeres.

3.2. Estimación de la indistinguibilidad parcial

Aunque dos firmas se solapen por ruido, no todo el volumen de sus regiones está necesariamente compartido. Para estimar el grado de solapamiento se define la métrica siguiente:

$$\mu_k = \frac{1}{|\bigcup_{i \in C_k} X_i|} \sum_{x \in \bigcup X_i} \mathbb{I}[m(x) > 1] \quad (7)$$

donde X_i es el conjunto de muestras generadas mediante análisis de Monte Carlo a partir de la firma i , $m(x)$ es el número de regiones que contienen la muestra x , y $\mathbb{I}[\cdot]$ es la función indicadora, tal que $\mathbb{I}[\text{true}] = 1, \mathbb{I}[\text{false}] = 0$. Esta métrica permite cuantificar la *indistinguibilidad parcial* dentro de cada agrupamiento C_k , siendo $\mu_k \in [0, 1]$. Valores cercanos a 1 implican un elevado solapamiento estadístico, lo que compromete la capacidad del sistema para distinguir la firma original.

3.3. Escalado relativo del ruido por red

Dado que la magnitud de las firmas hidráulicas $P(n, c)$ puede variar considerablemente entre redes, se define un *ruido relativo* que permite aplicar niveles equivalentes de incertidumbre en redes con diferentes escalas de presión, facilitando así la comparación entre redes heterogéneas. Para ello, se calcula el *ruido hidráulico global* de cada red como:

$$\Delta = \text{máx}(P(n, c)) - \text{mín}(P(n, c)), \forall n, c, \quad (8)$$

es decir, la diferencia entre el valor máximo y mínimo de todas las firmas simuladas en esa red. Este valor se usa como base para expresar la intensidad del ruido como un porcentaje δ_{rel} del rango total, obteniendo así la forma escalada de los parámetros de dispersión. Para el caso de **ruido uniforme**, se añade una variable aleatoria con una distribución $\mathcal{U}(-\delta, \delta)$, donde $\delta = \delta_{\text{rel}} \cdot \Delta/2$. Para el caso de ruido gaussiano, se añade una variable aleatoria con una distribución $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$, donde $\sigma = \delta_{\text{rel}} \cdot \Delta$.

4. Resultados

4.1. Clústeres frente a intensidad de ruido

Las Figuras 5-6 muestran el porcentaje con respecto a $N_{\text{clusters}}^{\text{máx}}$ que se forman bajo diferentes intensidades de ruido, para el caso uniforme y gaussiano. En todos los casos, se ha considerado $C = \{0.5, 2.5, 5.0\}$.

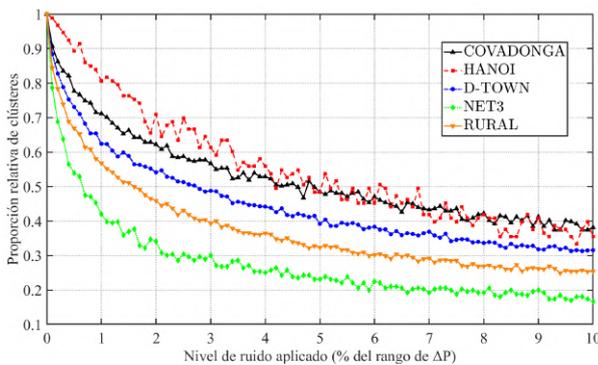


Figura 5: Proporción de agrupamiento de firmas hidráulicas frente al nivel de ruido **uniforme**.

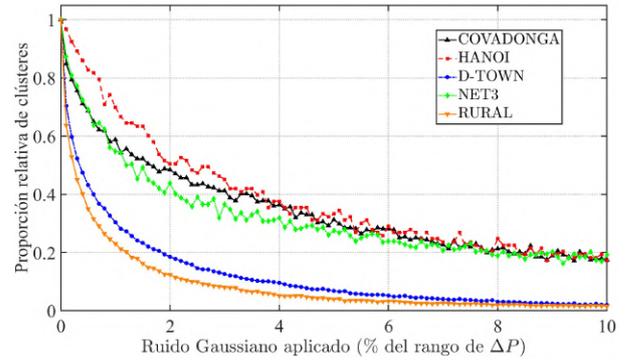


Figura 6: Proporción de agrupamiento de firmas hidráulicas frente al nivel de ruido **gaussiano**.

Se observa (Figuras 5-6) que el ruido uniforme provoca una pérdida progresiva de agrupamientos, más suave y escalonada, especialmente en redes pequeñas como Hanoi. En cambio, el ruido gaussiano genera un descenso más acelerado y pronunciado, afectando con mayor intensidad a redes de gran tamaño como D-Town y Rural (con ~400 nodos).

4.2. Probabilidad de indistinguibilidad

A partir de los valores individuales μ_k de cada agrupamiento, se define una métrica global de indistinguibilidad μ como el promedio ponderado sobre todos los *clústeres* generados. En la Figura 7 muestra el valor de μ obtenido mediante un análisis de Monte Carlo, generando 1000 puntos por cada firma hidráulica.

Se observa que la red mallada Net3 presenta el mayor nivel de indistinguibilidad. Esto sugiere una alta densidad de firmas similares y próximas en el espacio de presiones, lo que provoca que incluso con una incertidumbre moderada (3%), más del 80% de las firmas resulten indistinguibles. En contraste, otras redes malladas como Hanoi, de menor tamaño y complejidad, muestran una mayor resistencia al ruido, ya que el menor número de firmas dispersas reduce la probabilidad de solapamiento.

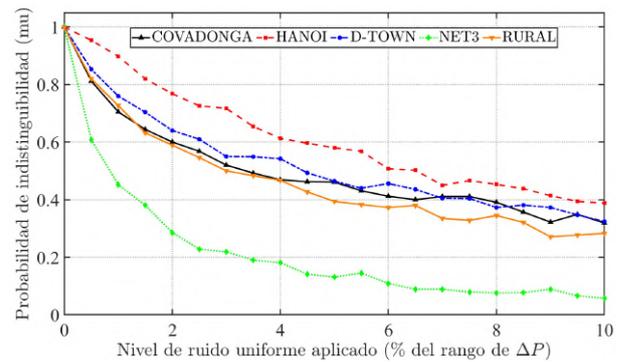


Figura 7: Probabilidad de indistinguibilidad.

El análisis de indistinguibilidad puede complementarse obteniendo, para cada muestra de Monte Carlo, el número de firmas hidráulicas a los que puede pertenecer. O, dicho de otro modo, la incertidumbre en la localización de las fugas. Esta información se presenta en la Figura 8 mediante un histograma. En concreto, se ha considerado ruido uniforme del 2% y los coeficientes $C = \{0.5, 2.5, 5.0\}$. Se aprecia que, para redes malladas, los solapamientos son pequeños. Frente al caso de la red jerárquica (Covadonga-IN), donde el 18.3% de los nodos solapan entre 10 y 55 veces. Esto parece indicar que en redes de

riego, la incertidumbre en la localización de fugas es mucho mayor.

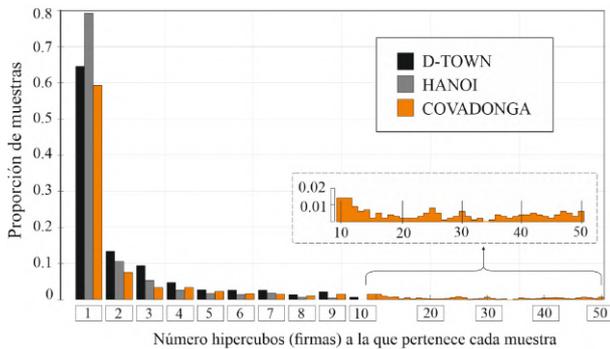


Figura 8: Histograma de solapamientos.

5. Discusión

A partir de los resultados anteriores, se pueden extraer algunas conclusiones:

- Se ha confirmado empíricamente que el ruido gaussiano degrada la información hidráulica de manera más abrupta que el ruido uniforme, lo que evidencia una mayor sensibilidad a este tipo de incertidumbre no acotada. Esto indica que, tal vez, el descarte de outliers en este caso parece obligatorio.
- Las redes jerárquicas con mayor proporción de nodos terminales, como Covadonga, muestran una mayor vulnerabilidad al ruido sugiriendo que la topología con baja redundancia tienden a perder distinguibilidad y favorecen un colapso prematuro del agrupamiento. En contraposición, las redes malladas, con mayor conectividad sostienen mejor la capacidad de discriminación frente al ruido.
- Las redes con más nodos pueden presentar mayor solapamiento entre firmas *si la dimensión del espacio (sensores $|S|$) es fija*. En $\mathbb{R}^{|S|}$, aumentar nodos eleva la densidad de firmas, incrementando potencialmente colisiones. Nota: Esto asume que $|S|$ no escala con el tamaño de la red. Si se añaden sensores ($|S| \uparrow$), la dinámica cambia. Aun así, fragmentar redes extensas en subregiones puede reducir solapamientos al disminuir la densidad local de firmas.
- La probabilidad de indistinguibilidad μ puede usarse para clasificar redes en términos de robustez topológica ante ruido, pero debe acompañarse, al menos, de la distribución del número de solapamientos por muestra.

6. Conclusiones

Este trabajo propone un análisis de factibilidad al problema de detección y localización de fugas en redes hidráulicas a partir de datos de sensores de presión. Se han establecido algunas conclusiones importantes en cuanto a la afectación de los ruidos y a la comparación entre redes malladas (WDN) y redes jerárquicas (IN).

En el futuro se pretende abordar otras métricas interesantes, como distancias entre posibles detecciones y posición real de la fuga, así como la inclusión del caudal como variable de análisis.

Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto DENORI, ref. GOPG-SE-23-0003, financiado por la Junta de Andalucía en el marco de los Grupos Operativos de la Asociación Europea de Innovación (AEI).

Referencias

- Boztaş, F., Firat, M., 2024. Development and implementation of a leak detection model using the genetic algorithm. *Water Practice & Technology* 19 (12), 4839–4854.
DOI: 10.2166/wpt.2024.293
- Casillas, P., Myrna, V., Garza, L., Cayuela, V. P., 2014. Model-based leak detection and location in water distribution networks considering an extended-horizon analysis of pressure sensitivities. *Journal of Hydroinformatics* 16 (3), 649–670.
DOI: 10.2166/hydro.2013.019
- Cholewa, M., Romaszewski, M., Głomb, P., Kołodziej, K., Gorawski, M., Koral, J., Koral, W., Madej, A., Musioł, K., 2024. “just one more sensor is enough”—iterative water leak localization with physical simulation and a small number of pressure sensors. *IEEE Sensors Journal* 24 (15), 24299–24307.
DOI: 10.1109/JSEN.2024.3413889
- Du, K., Li, J., Xu, W., Liu, Z., Zheng, F., 2023. Topology-distance-based clustering method for water distribution network partitioning. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 72 (11), 2186–2198.
DOI: 10.2166/aqua.2023.301
- Farah, E., Shahrou, I., 2024. Water leak detection: A comprehensive review of methods, challenges, and future directions. *Water* 16.
DOI: 10.3390/w16202975
- Fujiwara, O., Khang, D. B., 1990. A Two-Phase Decomposition Method for Optimal Design of Looped Water Distribution Networks. *Water Resources Research* 26, 539–549.
DOI: 10.1029/WR026i004p00539
- Lamo de Espinosa, J., 2024. Agua, agricultura y alimentos. un mundo sin hambre será de riego o no será. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros* (263), 1–8.
DOI: 10.24197/reeap.263.2024.1-8
- Marchi, A., Salomons, E., Ostfeld, A., 2014. Battle of the water networks ii. *Journal of Water Resources Planning and Management* 140 (7), 04014009.
DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000378
- Marzola, I., Mazzoni, F., Alvisi, S., Franchini, M., 2022. Leakage detection and localization in a water distribution network through comparison of observed and simulated pressure data. *Journal of Water Resources Planning and Management* 148 (1), 04021096.
DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001503
- Neto, F. M., Orihuela, L., Manzano, J. M., 2025. Application and assessment of model-based leak localization methods in an irrigation network. 2nd BrIAS Conference on Smart Agriculture, Brussels.
- Ormsbee, L., Hoagland, S., Hernandez, E., Hall, A., Ostfeld, A., 2022. Hydraulic model database for applied water distribution systems research. *Journal of Water Resources Planning and Management* 148 (8), 04022037.
DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001559
- Reis, A. L., Lopes, M. A., Andrade-Campos, A., Henggeler Antunes, C., 2023. A review of operational control strategies in water supply systems for energy and cost efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 175, 113140.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113140>
- Romero-Ben, L., Alves, D., Blesa, J., Cembrano, G., Puig, V., Duviella, E., 2023. Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective. *Annual Reviews in Control* 55, 392–419.
DOI: 10.1016/j.arcontrol.2023.03.012
- Rossman, L. A., Zyl, J. E. V., 2010. The open sourcing of epanet. *Water Distribution Systems Analysis*, 19–28.
DOI: 10.1061/41203(425)4
- Vegas Niño, O., Martínez Alzamora, F., Alonso Campos, J., Tzatchkov, V., 2017. Iniciación a la programación con la toolkit de epanet v2. 00.12 en un entorno windows. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
DOI: ISBN 978-607-9368-72-2