

# Efectos estacionales del clima sobre las fallas en conductos de redes de agua potable: caso de la red del Gran Lyon (Francia)

*Franco Trivisonno y Pascal Le Gauffre*

Universidad Nacional de Rosario, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

E-mail: [trivisonno.franco@gmail.com](mailto:trivisonno.franco@gmail.com)

**RESUMEN:** Este estudio se centra en el desarrollo de un modelo capaz de identificar los efectos estacionales de factores climáticos sobre las fallas en conductos de redes de distribución de agua potable. El análisis fue realizado con 17 años de registros relativos a la red del Gran Lyon (Francia). Para el caso de Lyon, mostramos que los efectos de los factores climáticos son estacionales, lo que conduce a la construcción de dos modelos complementarios. La variación de la cantidad anual de fallas observadas durante un conjunto de meses caracterizando el invierno (de noviembre a marzo) fue modelada como el efecto combinado del envejecimiento del patrimonio y de dos factores climáticos: la cantidad de días sin lluvia y la cantidad de horas de congelamiento. La variación de la cantidad anual de fallas observadas durante los otros meses (de abril a octubre) fue modelada como el efecto combinado del envejecimiento del patrimonio y de un factor climático: la cantidad de horas de insolación. Fueron propuestos diversos escenarios de evolución climática. El escenario resultante de la combinación más pesimista de hipótesis propuestas en este estudio condujo a un aumento del 35 % de la cantidad anual de fallas.

## INTRODUCCIÓN

La eventualidad de un cambio climático sería el problema más crítico y desafiante que la humanidad podría afrontar este siglo: inundaciones, sequías, aumento del nivel del mar y calor y frío extremos son algunas de las consecuencias que se presentarían a nivel global. Su condición de efecto global hace que requiera ser abordado tanto local como globalmente. Con esta intención, y en el marco del proyecto PREPARED, se plantea el desarrollo de programas de rehabilitación e inversión para sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento en determinado grupo de ciudades europeas para permitirles estar preparadas y ser resistentes a los impactos del cambio climático (PREPARED, 2009). Una de éstas es Lyon, que situada al este de Francia entre los Alpes y el Macizo Central en la confluencia de los ríos Ródano y Saona es la segunda ciudad del país con casi medio millón de habitantes y cuya área urbana, el Gran Lyon, resulta la segunda aglomeración francesa al reunir más de 2 millones de habitantes. La distribución de agua potable en el Gran Lyon es gestionada por dos empresas: Veolia Eau, que se encarga del 75 % (aproximadamente 3000 Km de la red troncal), y Lyonnaise des Eaux, ocupándose de la parte restante.

Con el fin de preparar a la red de agua del Gran Lyon ante los efectos de un eventual cambio climático, se propone el desarrollo de un modelo capaz de explicar las fallas en los conductos relacionándolas con las condiciones climáticas. Otros modelos basados en el clima fueron desarrollados anteriormente para el caso de Lyon, tanto considerando un solo factor climático (Poinard, 2006) como varios (Benoit, 2011), pero siempre pensando en una escala mensual. Pero diferenciándose, este estudio encuentra su particularidad promoviendo un modelo estacional. Una vez que el modelo explicativo sea desarrollado sería necesario un pronóstico del clima, de un mediano a un largo plazo, para entonces prever las fallas y usar estos resultados como datos de entrada en programas de planeamiento y rehabilitación del patrimonio urbano, tales como CARE-W (Le Gauffre et al., 2008).

## INFLUENCIA DEL CLIMA SOBRE LAS FALLAS DE CONDUCTOS

Los conductos de agua fallan por rotura cuando las condiciones ambientales y de operación ejercen tensiones que superan su resistencia estructural; estos factores pueden ser estáticos o temporales. Por ejemplo, el tipo de material y el diámetro de un conducto y el tipo de suelo son factores estáticos que influyen en el deterioro del mismo conducto, mientras que las temperaturas del suelo y el agua son factores temporales y aleatorios que pueden influenciar la tasa de falla de los conductos (Kleiner et al., 2000).

Ante una caída en la temperatura, los conductos de metal se contraen, y si la contracción es impedida por restricciones externas, aparecen tensiones de tracción en el material. La tensión es proporcional al descenso de temperatura, el módulo de elasticidad del material y su coeficiente de dilatación térmica. Estas tensiones deben ser superpuestas a las que podrían ya existir en el conducto debido a la presencia de cargas externas y presiones internas. Las cargas externas corresponden tanto al peso del suelo sobre el conducto (que es espacialmente variable dependiendo del contenido de humedad y el tipo de suelo) como a las cargas originadas por el congelamiento de ciertas lentillas de suelo que debido a la expansión pueden hasta doblar el

peso normal del mismo. También es necesario considerar, además de esta sobrecarga, que el suelo congelado transmite más directamente el peso de eventuales vehículos circulando sobre caminos situados en la superficie (Habibian, 1994) (Babovic et al., 2002).

Por otra parte, ante un incremento en la temperatura, aparecen tensiones de compresión. Sin embargo, los conductos tienden a romper en menor medida en verano que en invierno debido a que presentan imperfecciones en su constitución que los hace menos resistentes a tracción que a compresión. Es ampliamente reconocido, además, que los conductos de fundición gris son más frágiles que los de fundición dúctil y también que los conductos de diámetros más pequeños tienden más a experimentar fallas circunferenciales que los conductos de diámetros más grandes (Rajani et al., 1996).

Poinard (2006), con su estudio sobre la red de distribución de agua potable del Gran Lyon, ha mostrado que la inclusión de un factor climático mensual podría explicar variaciones en el número de fallas anuales de aproximadamente 30 % alrededor de una tendencia lineal debida al envejecimiento. El análisis fue realizado de 1992 a 2002 en conductos de fundición gris situados bajo calzada con diámetros menores a 250 mm. El factor climático elegido fue el que presentó la mejor correlación entre su variación mensual y el número mensual de fallas de conductos, *i.e.* la temperatura mínima negativa absoluta; la tendencia debida al envejecimiento resultó de alrededor de +5 %/año.

Otros estudios, esta vez analizando redes de agua potable en Australia y Canadá, mostraron la importancia de tener en cuenta otros factores climáticos para explicar las variaciones estacionales en el número de fallas de conductos. Adicionalmente al congelamiento, el déficit de humedad en el suelo debido a la ausencia de precipitaciones y, eventualmente, a una evaporación importante incrementa el número de fallas. Por esta razón, un verano seco y cálido tiende a incrementar la tasa de fallas del invierno siguiente, que ocurren debido al congelamiento (Kleiner et al., 2000). En los conductos primarios de las redes australianas, es durante los meses más cálidos y secos del verano en las cuales se registra el mayor número de fallas (Gould et al., 2009).

Fuchs-Hanusch et al. (2011), al trabajar con redes de agua austríacas, confirmaron que, para regiones de clima moderado, resulta de un importante interés considerar los efectos climáticos estacionales en fallas de conductos, tales como la severidad del invierno representada por un índice de congelamiento o *Freezing Index* (FI), la humedad del suelo representada por un índice de sequedad o *Dry Index* (DI) o por un déficit de lluvia o *Rain Deficit* (RD). Los resultados del análisis estadístico han mostrado una correlación entre la severidad del invierno y la ocurrencia de fallas de ciertas categorías de conductos primarios, tal como la que forman los conductos de fundición gris de pequeños diámetros.

## DATOS

### *Datos meteorológicos*

Los datos meteorológicos utilizados son mensuales y pertenecen al período enero 1993-diciembre 2010. Parte de esta información proviene de la estación meteorológica de Météo France emplazada en la comunidad de Bron (situada al este del Gran Lyon): temperaturas medias mínima y máxima (promedio en el mes de temperaturas mínima y máxima diarias), temperaturas mínima y máxima absolutas, período de fuerte calor (número de horas con  $T > 30\text{ °C}$ ), duración de congelamiento (número de horas con  $T < 0\text{ °C}$ ) y duración de la luz solar o insolación. El resto de los datos, los relativos a la lluvia, fueron proporcionados por la Comunidad Urbana del Gran Lyon, que dispone de 32 pluviómetros distribuidos a través de toda el área urbana (de los cuales se utilizaron los 27 que están localizados dentro del área de estudio).

Al observarse únicamente el efecto estacional del clima, es necesario mantener en el análisis sólo factores climáticos que puedan acumularse:

- Duración de congelamiento [h]
- Período de fuerte calor [h]
- Insolación [h]
- Precipitación total [mm]
- Precipitación media (sobre el Gran Lyon) [mm]
- Cantidad de días con precipitación media mayor a 1 mm

### *Registro de fallas*

La información acerca de las fallas fue brindada por Veolia Eau. Los operadores en el terreno al momento de la observación deben proporcionar la siguiente información: la fecha de la intervención, el código postal, el tipo de estructura (conducto primario, conducto secundario, válvula, boca de incendio, etc.), el tipo de degradación y el diámetro y el material del conducto. En el caso de tratarse de conductos primarios, los operadores deben también proporcionar la clave primaria, que es un número identificador del conducto. Este número refiere a una base de datos que lista todos los conductos en la red, y muestra información adicional: localización (vereda, calzada, etc.), longitud, fecha de instalación (y de remoción, si es el caso), diámetro, material, presión, etc. Si el operador se equivocara al ingresar el código primario, no habría manera de rastrear la historia del conducto y, por lo tanto, tampoco las fechas de instalación y de posible remoción de la línea defectuosa. Esto constituiría un problema ya que significaría trabajar con datos ocultos. Es importante notar también que la fecha reportada de falla es en realidad la fecha de reparación y no la fecha de ocurrencia de la falla. Usualmente unos pocos días separan estos dos eventos.

## ANÁLISIS SOBRE UNA DETERMINADA CATEGORÍA DE CONDUCTOS

Se manifiesta un comportamiento cíclico en la ocurrencia de fallas estructurales (excluyendo las fallas en los nodos, en las válvulas, etc.) no accidentales en conductos primarios y secundarios para el período 1999-2010, con un pico en verano para los conductos secundarios y un pico en invierno para los conductos primarios. Los conductos primarios de fundición gris alcanzan un número alto de fallas durante los meses de invierno (entre el 45 % y el 50 % del total de las fallas en los tres meses de invierno); otros materiales presentan perfiles menos pronunciados y demasiado insignificantes. En el caso de los conductos secundarios, dejando además de lado las fallas ocurridas en conductos de diámetro mayor a 60 mm (cuyo comportamiento es cercano al que manifiestan los conductos primarios), emerge la tendencia opuesta para las cañerías de polietileno y plomo, pero menos significativamente (presentando entre un 3 % y un 6 % más fallas en los meses de verano que en los meses de invierno) (Benoit, 2011).

De un estudio probabilístico de la red del Gran Lyon con el programa informático CARE-W\_Poisson (Poinard, 2006), que analiza riesgos relativos entre categorías definidas en base a un modelo de regresión de Poisson, los conductos de fundición gris resultan entre 3,3 y 3,9 veces más propensos a fallar que los compuestos por otros materiales, aquellos con diámetro menor o igual a 250 mm son entre 3,7 y 5,5 veces más propensos a fallar que los de diámetros mayores, y los localizados bajo calzada son entre 1,06 y 1,14 veces más propensos a fallar que aquellos situados en otras ubicaciones (bajo vereda, etc.).

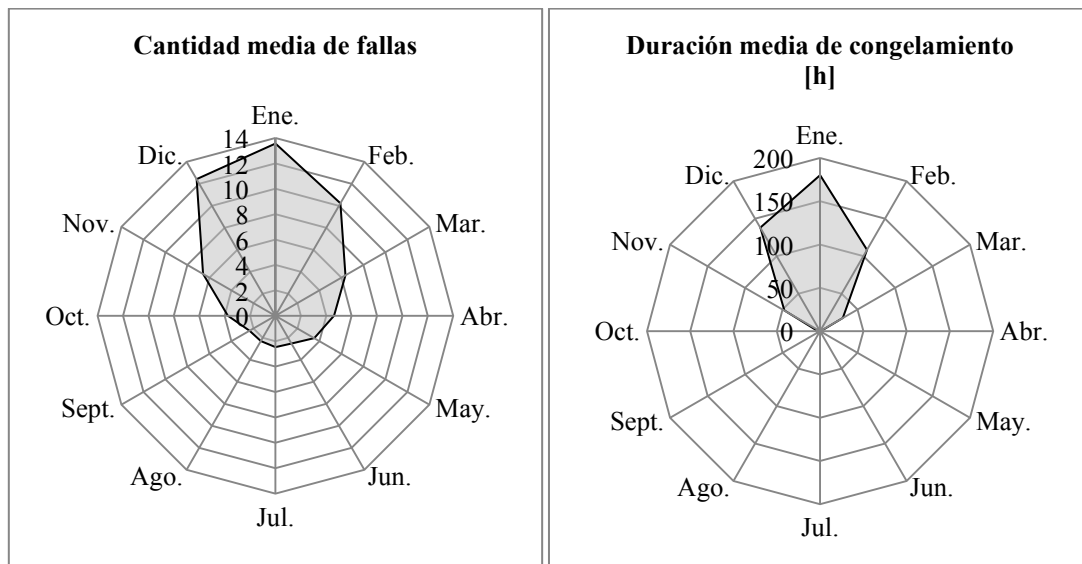
A partir de estos antecedentes, se decidió utilizar para este trabajo datos de fallas estructurales no accidentales ocurridas entre enero de 1993 y diciembre de 2010 en conductos primarios de fundición gris de diámetro mayor o igual a 60 mm pero sin exceder 250 mm y ubicados bajo calzada. De manera de trabajar sobre una población constante, sólo se consideraron los conductos emplazados antes de 1993 y todavía en servicio a fines de 2010. Este grupo de más de 11000 conductos representa aproximadamente 680 Km, alrededor de un 20 % de la red en cuestión que sin embargo concentra el 80 % de las fallas estructurales, porcentaje que representa la mitad de las intervenciones realizadas en la totalidad de la red troncal.

Como fue mencionado anteriormente, ante un error del operador al registrar la clave primaria del conducto, es posible conocer el material y el diámetro del mismo, pero resulta inviable identificar el conducto y no se puede estar seguro si el mismo está todavía en servicio y por lo tanto incluido dentro de la categoría en estudio. Estos conductos sin identificar fueron contados como desconocidos y se consideró que la mitad de ellos cumplían las condiciones especificadas. Considerando estos casos, resulta una tasa de aproximadamente 0,1 fallas/(Km.año) dentro del patrimonio elegido.

## ESTACIONALIDAD

Las fallas causadas por el clima están vinculadas a diferentes mecanismos en conductos de acuerdo a la estación del año. Por lo tanto, un modelo de previsión debería diferenciar el modo en que preavisa las fallas de acuerdo a esta estacionalidad.

Limitando el estudio a la selección de conductos ya descrita se observa todavía una concentración de la media de fallas en los meses de invierno durante el período 1993-2010. Se presenta una coincidencia entre las variaciones de las medias de congelamiento, factor controlador en el proceso invernal causante de fallas en los conductos, y de fallas. Sólo durante el período noviembre-marzo se observa una duración media de congelamiento superior a 1 hora (Figura 1). Considerando además que la cantidad invernal de fallas constituye una porción muy importante del número total, podría conjeturarse que aún a una escala anual el congelamiento sería la principal causa de fallas en la categoría seleccionada de conductos.

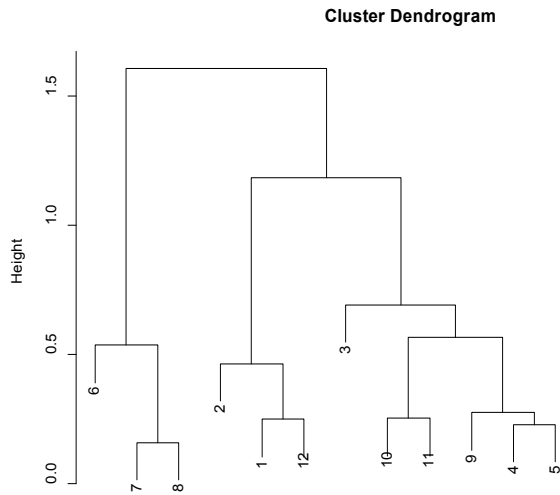


**Figura 1.-** Variación mensual del número medio de fallas (izq.) y duración media de congelamiento [h] (der.) sobre el período entero de observación.

### División del año

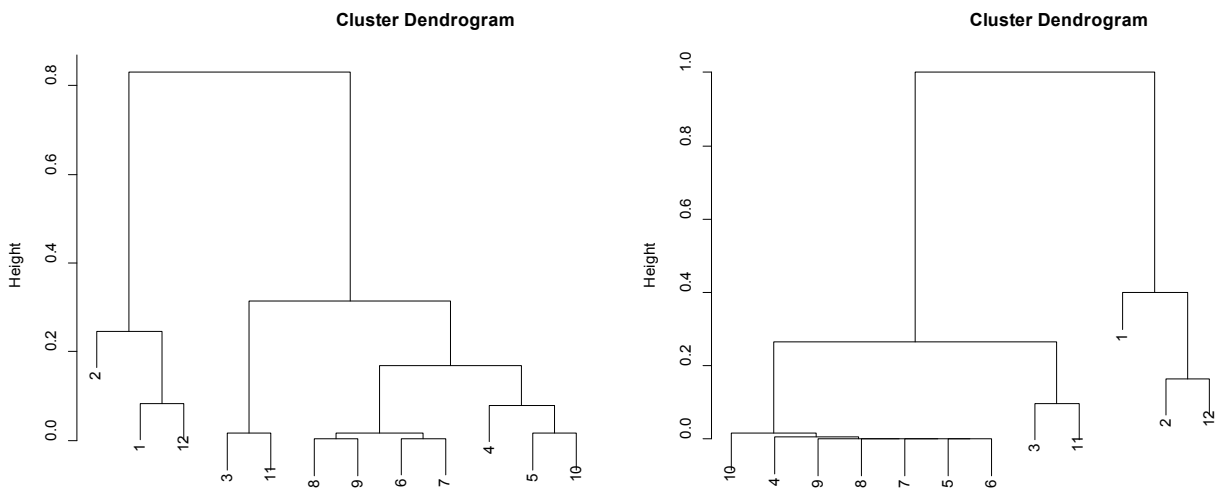
El enfoque estacional tomado por este trabajo, avalado por la existencia de diferentes mecanismos de fallas en conductos según el clima de las estaciones del año, hace necesario el agrupamiento de los meses en unidades de estudio, tanto para considerar un registro de fallas como para caracterizar el clima que pueda causar las mismas.

Ingresando cierto grupo de medias de registros meteorológicos mensuales (en sus valores normalizados) en dendrogramas de clusters para medir la distancia euclidiana entre ellos y su agrupamiento, dentro de los cuales los meses figuran según su orden calendario, *i.e.* enero como “1”, febrero como “2”, etc., puede apreciarse cierta afinidad climática en determinados conjuntos de meses. El período diciembre-febrero bien podría representar el invierno y el período junio-agosto podría representar el verano. Aparte, los períodos de media estación (marzo-mayo y septiembre-noviembre) presentan un clima diferente (Figura 2). Análogamente, pero agrupando según las medias de las fallas mensuales, se confirma la definición de invierno como el período diciembre-febrero. Por otro lado, ordenando según las medias de congelamiento (que es un factor controlador del proceso causante de fallas en invierno, y considerando que las fallas se concentran en esta estación) se confirma el período diciembre-febrero como invierno (Figura 3).



**Figura 2.-** Dendrograma de clusters mostrando la distancia euclidiana entre las medias normalizadas de datos mensuales (compuestos por un grupo de factores climáticos significativos: duración de congelamiento, período de fuerte calor, insolación, precipitación total y cantidad de días con precipitación media superior a 1 mm) y su agrupamiento.

De acuerdo a la prevalencia dada a las fallas invernales y aceptando cierto desfase temporal tanto en el efecto del clima (las condiciones climáticas presentes en noviembre podría causar fallas en diciembre) como en la observación de las fallas (ciertas fallas observadas en diciembre podrían haber ocurrido en noviembre, como también ciertas fallas observadas en marzo podrían haber ocurrido en febrero) se decidió considerar como Invierno (W) al período noviembre-marzo. Los meses restantes (abril-octubre), aún si el verano también muestra cierto comportamiento característico, fueron agrupados en un único período denominado No Invierno (NW) (Figura 4).



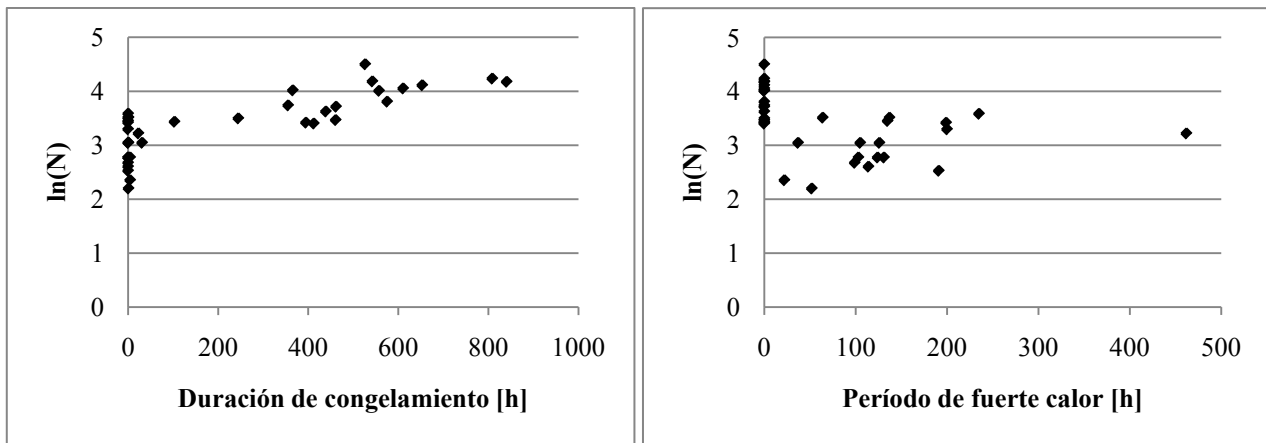
**Figura 3.-** Dendrograma de clusters mostrando la distancia euclidiana entre las medias normalizadas de fallas mensuales (izq.) y duraciones mensuales de congelamiento (der.) y sus respectivos agrupamientos.

No invierno (NW)							Invierno (W)				
Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.

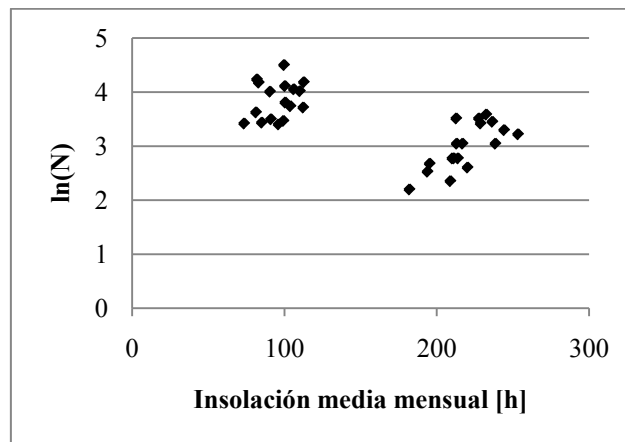
**Figura 4.-** División del año, a ser utilizada en los siguientes análisis.

### *Fallas relacionadas a la estacionalidad climática*

Con el fin de verificar que la división del año ya definida represente adecuadamente la estacionalidad climática se trazaron las correlaciones entre los logaritmos de las fallas de Invierno y No Invierno y parámetros meteorológicos registrados contemporáneamente. Una parte importante del logaritmo natural de las fallas corresponde a valores nulos de período de fuerte calor y duración de congelamiento. Como puede conjeturarse, estos valores corresponden a fallas ocurridas en Invierno y a fallas ocurridas durante No Invierno, respectivamente (Figura 5). Luego, observando la insolación media mensual pueden diferenciarse dos nubes de puntos: la de menores valores de insolación corresponde a las fallas de Invierno y la otra, con mayores valores, corresponde a las fallas ocurridas en No Invierno (Figura 6).



**Figura 5.-** Logaritmo natural de la cantidad de fallas estacionales observadas relacionado a la duración de congelamiento (izq.) y al período de fuerte calor (der.) durante el mismo período de tiempo.



**Figura 6.-** Logaritmo natural de la cantidad de fallas estacionales observadas relacionado a la insolación media mensual durante el mismo período de tiempo.

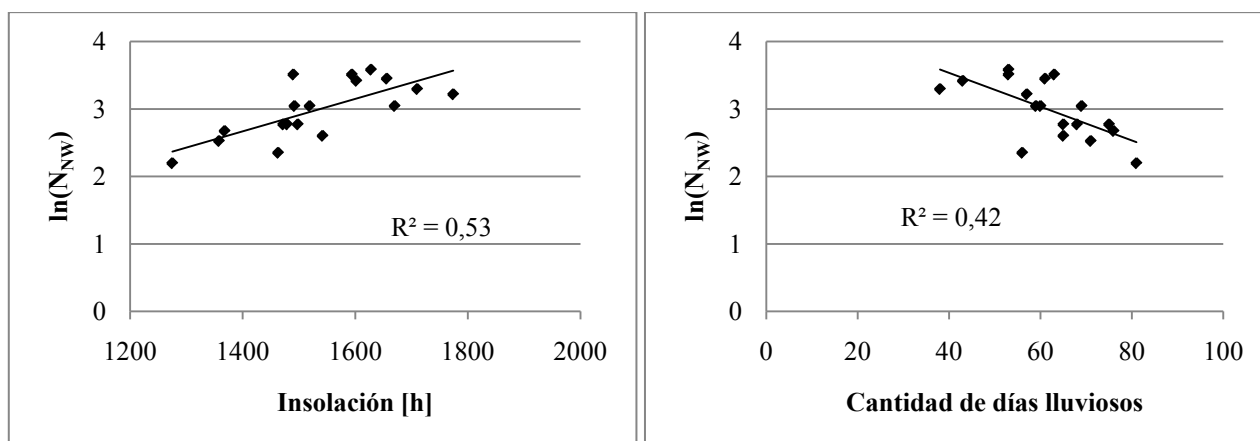


## FACTORES CLIMÁTICOS SOBRE FALLAS DE INVIERNO Y NO INVIERNO

La falla de conductos es el resultado de un proceso complejo, de modo que al intentar modelizarlo, el conocimiento acerca qué parámetros incluir en el modelo es invaluable. De manera de escoger qué factores climáticos son los mejores explicando dos modelos (uno para prever las fallas de Invierno y el otro para prever las de No Invierno) fue realizado un análisis de correlación estadística, variando el tamaño del período de observación climática y su ubicación respecto del período dentro del cual se registran las fallas (Invierno y No Invierno), es decir la consideración de desfases temporales.

### *Fallas de No Invierno*

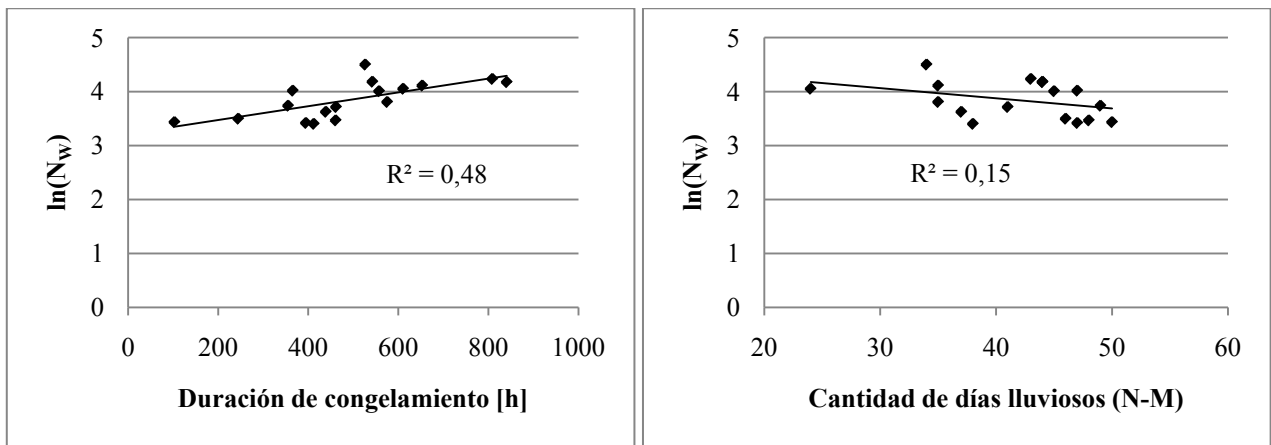
Los mejores resultados del estudio de correlación fueron obtenidos relacionando las fallas de No Invierno con el clima de ese mismo período de tiempo, mostrando que en este caso no se encuentra un desfase temporal para los fenómenos que las causan. Los factores climáticos mejor correlacionados resultaron ser la insolación y la cantidad de días con precipitación media superior a 1 mm (Figura 7). Sin embargo, existe una correlación entre estos dos factores ( $R^2 = 0,56$ ).



**Figura 7.-** Logaritmo natural del número de fallas observadas en el período abril-octubre relacionado a la insolación (izq.) y a la cantidad de días con precipitación media superior a 1 mm (der.) durante el mismo período de tiempo.

### *Fallas de Invierno*

Las fallas de Invierno mostraron estar mejor correlacionadas con la duración de congelamiento registrada en el mismo período de tiempo (Figura 8, izq.). Fue encontrada también una buena correlación con el número de días con precipitación media superior a 1 mm, pero registrada en el período abril-marzo ( $R^2 = 0,32$ ), sin embargo esta variable no es independiente de la primera elegida: se encontró una correlación significativa entre estos dos factores climáticos, aún considerando diferentes desfases temporales en la observación de la variable vinculada con la lluvia. Sólo considerando a la variable vinculada a la lluvia en el mismo período de tiempo que las fallas de Invierno se encontró cierta independencia entre los dos factores climáticos elegidos ( $R^2 = 0,18$ ). Sin embargo, la correlación entre las fallas y el factor climático vinculado con la lluvia no es tan fuerte como lo es considerando el desfase temporal (Figura 8, der.).



**Figura 8.-** Logaritmo natural de la cantidad de fallas observadas en el período noviembre-marzo relacionado a la duración de congelamiento (izq.) y a la cantidad de días con precipitación media superior a 1 mm (der.) en el mismo período de tiempo.

Ya que el mecanismo de falla asumido para el período invernal (condiciones secas y cálidas seguidas por un invierno frío causan penetración de la congelación en el suelo) considera un desfase temporal en la observación del clima, se esperaba una verificación de esa idea en este análisis de correlación. Particularmente, se esperaba que los factores climáticos vinculados a la lluvia, observados en otoño, tuvieran una relación con las fallas observadas luego en invierno.

## MODELO BASADO EN EL CLIMA

La primera idea que emerge de un análisis cualitativo de los datos es la existencia de una relación lineal entre los factores climáticos y los datos de fallas. Luego es propuesto que el número de fallas ( $N$ ) de un período dado sea el resultado de una combinación lineal de variables temporales dependientes explicativas  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (e.g., edad del conducto, temperatura, precipitación). Pero para extender el rango de la variable dependiente (número de fallas) de  $[0; \infty)$  a todos los números reales, *i.e.*  $(-\infty; +\infty)$ , se propone que el logaritmo natural del número de fallas de un período dado sea el resultado de una combinación lineal de las variables explicativas. Como resultado de este enfoque surge un modelo exponencial:

$$N = \exp(a_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i) \quad (1)$$

donde  $a_0, a_1, \dots, a_n$  son parámetros que pueden ser encontrados por regresión por mínimos cuadrados o utilizando máxima verosimilitud.

Como fue hecho previamente, es deseable particionar la población de conductos primarios en grupos que resulten apreciablemente uniformes y homogéneos con respecto a su respuesta a la deterioración y a los mecanismos inductores de tensiones. Los criterios de agrupamiento podrían ser propiedades tales como tipo de material, tamaño del conducto, tipo de suelo, etc. (Kleiner et al., 2000).

En principio, Shamir y Howard (1979), sugirieron que una tendencia debida al envejecimiento es una causa importante de las fallas. Ya que la edad de los conductos es una variable dependiente del tiempo, ésta podría ser añadida al modelo exponencial presentado anteriormente. De todas maneras, al proponer una tendencia debida al envejecimiento de crecimiento no lineal, uno piensa en una expresión como la siguiente:

$$N = N_0(1 + k)^n \quad (2)$$

donde  $N_0$  es el número de fallas en un instante inicial,  $k$  es la tasa de crecimiento no lineal y  $n$  el tiempo transcurrido, en años, desde el instante inicial, significando que cada año el número de fallas crece  $1 + k$  veces. Debido a que este crecimiento no lineal puede ser aproximado a uno exponencial:

$$(1 + k)^n = \exp(nk) \quad (3)$$

El componente debido al envejecimiento concuerda fácilmente con el modelo multivariado temporal exponencial presentado aquí.

#### *Modelo de no invierno*

Del análisis estadístico había surgido que en este caso el factor climático mejor correlacionado es la insolación, entonces ésta fue la única variable climática utilizada en este modelo, cuya expresión resulta:

$$N_{NW} = \exp(a + bx + nk) \quad (4)$$

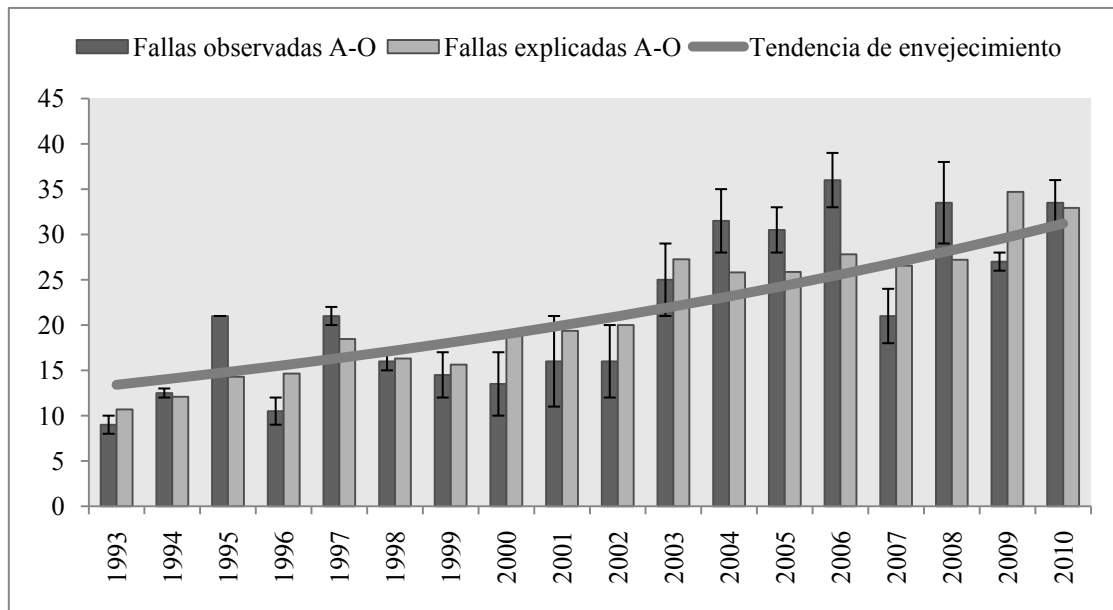
donde  $N_{NW}$  es el número de fallas a ocurrir en el período de no invierno,  $x$  es la insolación acumulada, en horas, durante el mismo período de no invierno,  $k$  es la tasa anual de crecimiento no lineal para el período de no invierno y  $a$ ,  $b$  y  $n$  son parámetros constantes relativos al número inicial de fallas, el efecto del factor climático sobre los conductos y el tiempo transcurrido a partir de un instante inicial. Diferentes variaciones de este modelo fueron evaluadas, sustrayendo diversamente las variables y evaluando según la Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM). Ninguna variación mejoró el original ( $RECM = 4,6$ ). Finalmente fue hecha una calibración sobre el período entero de observación (1993-2010) (Tabla 1) permitiendo definir los parámetros del modelo (Tabla 2), cuya representación puede verse en la Figura 9.

**Tabla 1.-** Calibración del modelo definitivo de No Invierno.

<b>Período de calibración</b>	1993-2010
<b>Período de validación</b>	-
<b>RECM<sub>calibración</sub> = RECM<sub>total</sub></b>	4,6 fallas
<b>RECM<sub>validación</sub></b>	-

**Tabla 2.-** Parámetros del modelo definitivo de No Invierno.

<b>Parámetros del modelo de no invierno</b>		
<b>a</b>	<b>b</b>	<b>k</b>
1,243	0,0008835	0,04960



**Figura 9.-** Modelo basado en el clima explicando fallas anuales ocurridas en períodos de No Invierno.

La tasa anual de crecimiento exponencial de No Invierno corresponde a una amplificación de  $\exp(k) = \exp(0,04960) = 1,051$  cada año en el número de fallas de no invierno (5,1 % anual).

#### *Modelo de invierno*

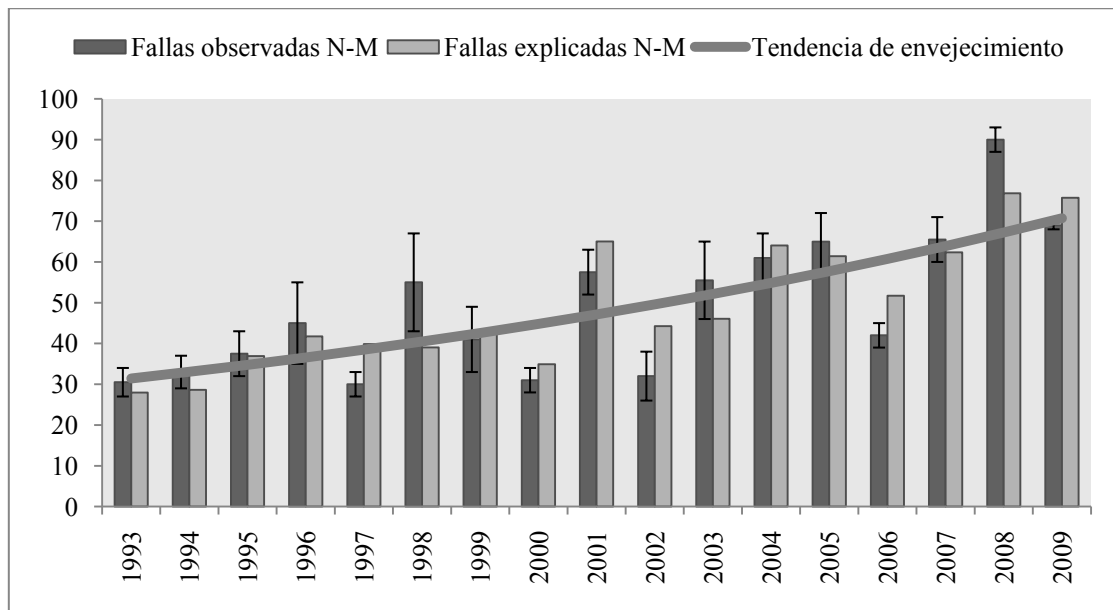
Del análisis estadístico habían surgido para este caso la duración de congelamiento y la cantidad de días con precipitación media superior a 1 mm como los factores climáticos mejor correlacionados, de modo que éstas fueron las únicas dos variables incluidas en el modelo; luego la expresión del modelo resultó:

$$N_W = \exp(c + dy + fz + nq) \quad (5)$$

donde  $N_W$  es el número de fallas a ocurrir en el período de invierno,  $y$  es la duración acumulada de congelamiento, en horas, durante el mismo período de invierno,  $z$  es el número de días con precipitación media superior a 1 mm durante el mismo período invernal,  $q$  es la tasa de crecimiento no lineal anual para el invierno y  $c$ ,  $d$ ,  $f$  y  $n$  son parámetros constantes relativos al número inicial de fallas, el efecto del clima sobre los conductos y el tiempo transcurrido desde un instante inicial.

Análogamente a como fue hecho con el otro modelo, éste fue desagregado para entender la importancia de cada componente; adicionalmente se consideraron diferentes desfases temporales para cada variable. Una vez más la versión original del modelo resultó la mejor ( $RECM = 7,9$ ).

El modelo invernal de tres variables fue calibrado sobre el período entero de observación, excepto por el año 2002 ya que en ese año se produjo un cambio en el modo del conteo de las fallas (Tabla 3). De esta calibración surgen los parámetros del modelo (Tabla 4), cuya representación puede verse en la Figura 10.



**Figura 10.-** Modelo basado en el clima explicando fallas anuales ocurridas en períodos de invierno.

**Tabla 3.-** Calibración del modelo definitivo de invierno.

<b>Período de calibración</b>	1993-2001, 2003-2009
<b>Período de validación</b>	-
<b>RECM<sub>calibración</sub></b>	7,4 fallas
<b>RECM<sub>validación</sub></b>	-
<b>RECM<sub>total</sub></b>	7,9 fallas

**Tabla 4.-** Parámetros del modelo definitivo de invierno.

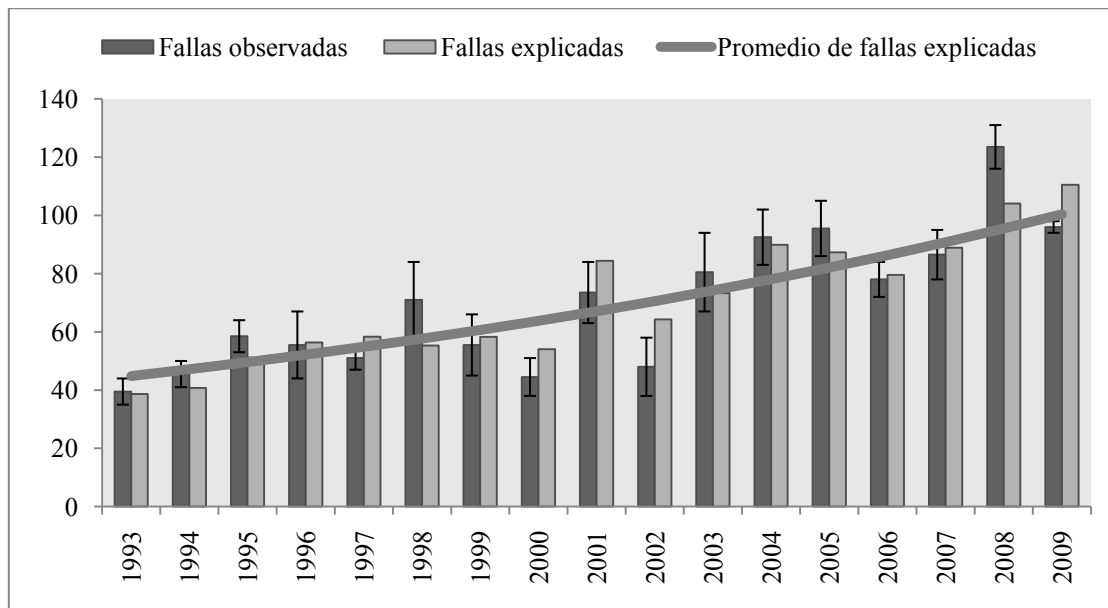
<b>Parámetros del modelo invernal</b>			
<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>	<b>q</b>
3,930	0,0002843	-0,01421	0,04935

Esta tasa anual de crecimiento exponencial de Invierno corresponde a una amplificación de  $\exp(q) = \exp(0,04935) = 1,051$  cada año en el número de fallas de Invierno (5,1 % anual).

*Suma de los dos modelos estacionales*

Se efectuó la adición de los dos modelos para explicar una cantidad anual de fallas ( $N$ ) (Figura 11):

$$N = N_{NW} + N_W \quad (6)$$



**Figura 11-** Modelo de dos componentes basado en el clima explicando las fallas anuales totales.

Calculando sobre el período completo de observación, excepto por el año 2002, se encontró que:  $RECM = 9,023$  fallas, y haciéndolo sobre el período entero de observación:  $RECM_{total} = 9,755$  fallas.

### Interpretación

Hay varios años en los cuales el modelo errores importantes: 1995, 1997, 1998, 2000, 2002, 2008 y 2009. Las diferencias más grandes se encuentran en el año 2002 (sobreestimación) y en el año 2008 (subestimación), y en menor medida en los años 2009 (sobreestimación) y 1998 (subestimación). Es importante saber que existe una incertidumbre significativa en los datos de fallas de los años 1998 y 2002. Es sabido de la empresa Veolia Eau que en el año 2002 el registro de fallas presentó un cambio y entonces resulta aceptable desechar datos de fallas provenientes de este año dentro del análisis, como fue hecho en la calibración del modelo de Invierno. Por otra parte, la subestimación de 2008, seguida por una sobreestimación de un tamaño similar en 2009 podría indicar un desfase temporal en la obtención de datos de fallas de conductos. Las fallas ocurridas en 2008 podrían haber sido observadas en 2009.

Del análisis independiente de cada uno de los dos modelos estacionales, puede apreciarse que ambas tasas de crecimiento anuales equivalen a un crecimiento no lineal del 5,1 %. Esto podría confirmar que la elección de los factores climáticos fue adecuada, representando bastante bien los efectos del clima en los conductos, ya que las fallas remanentes son explicadas por un efecto idéntico del envejecimiento. A partir de esta tendencia única de envejecimiento se actualizaron los datos de falla (análogamente a una actualización de precios en un análisis financiero) de manera de repetir el estudio de correlación pero despejando la influencia del envejecimiento. El coeficiente de correlación  $R^2$  de la insolación, para el modelo de No Invierno, disminuyó de 0,53 a 0,31; para el modelo de Invierno éste mismo coeficiente disminuyó de 0,48 a 0,24 para la duración de congelamiento y aumentó de 0,15 a 0,33 para la cantidad de días con precipitación media superior a 1 mm.

## ESCENARIOS DE EVOLUCIÓN

Ante la ausencia de pronósticos a mediano o largo plazo relativos al cambio climático a una escala local de los parámetros meteorológicos utilizados en el modelo, fueron propuestos diferentes escenarios de evolución climática (S1, S2, ..., S5) al modelo global, constituidos de diferentes modificaciones a los valores medios de los parámetros (Tabla 5). Se trata de propuestas arbitrarias basadas en información histórica, no es posible añadir un eje temporal a dichas hipótesis de evolución. Es importante tener en cuenta, además, que la evaluación está hecha sobre el mismo patrimonio considerado para el desarrollo del modelo y en un período de la misma duración de tiempo.

**Tabla 5.-** Variación promedio en las fallas previstas como resultado de diferentes escenarios de evolución.

<b>Escenario</b>	S1	S2	S3	S4	S5
<b>Insolación</b>	0%	4%	8%	13%	17%
<b>Congelamiento</b>	0%	19%	38%	56%	75%
<b>Precipitación</b>	0%	-8%	-17%	-25%	-33%
$N_m^f/N_m^0$	1,00	1,08	1,16	1,25	1,35

## CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

Este estudio muestra que, en el caso de la ciudad de Lyon, los efectos de los factores climáticos en las fallas observadas de los conductos primarios de agua son estacionales. El desarrollo de los dos modelos estacionales complementarios explica el número anual de fallas observadas durante los 17 años de estudio de un patrimonio constante. La variación del número anual de fallas observadas durante un grupo de meses representando el invierno (de noviembre a marzo) fue modelizado como el efecto combinado del envejecimiento del patrimonio y dos factores climáticos: el número de días con precipitación media mayor a 1 mm y la duración de congelamiento, en horas. La variación del número anual de fallas observadas durante los meses restantes (de abril a octubre) fue modelizada como el efecto combinado del envejecimiento del patrimonio y un factor climático: la insolación, en horas.

El modelo basado en el clima, desarrollado en este trabajo, es capaz de prever globalmente las fallas en la categoría de conductos seleccionada, con un margen de error aceptable: la RECM obtenida sobre el período 1993-2009 es de 9,8 fallas. Este modelo indudablemente más simple que los demás desarrollados para el caso de Lyon, ya que requiere de una cantidad mucho menor de variables al aceptar un enfoque estacional en los efectos del clima sobre los conductos, en vez de repetir el análisis mensual efectuado por otros autores.

Fueron propuestos diversos escenarios de evolución climática. El escenario resultante de la combinación más pesimista de hipótesis condujo a un incremento del 35 % del número anual de fallas.

Es importante destacar que evaluar un modelo como éste no es simple, ya que existe cierta indeterminación en la información de fallas. Existen más fallas que las contenidas en el registro de fallas. El número de fallas

observadas depende no sólo del clima, tensiones naturales derivadas del envejecimiento y tensiones operacionales (*e.g.*, variación de presiones, no consideradas en este trabajo): la actividad de búsqueda de fallas es un factor principal. Si no hubiera quejas por parte de los usuarios ni campañas de detección de fugas, gran parte de las fallas no serían percibidas. De aquí la importancia de las acciones gerenciales: campañas regulares de detección de fallas son necesarias para conocer la representación de la información disponible de fallas sobre las fallas totales ocurridas.

Aceptando el modelo desarrollado en esta oportunidad todavía existiría cierta incertidumbre en el impacto del cambio climático a una escala local. Actualmente se encuentran modelos desarrollados por el centro de investigación europeo CERFACS, los cuales proveerían escenarios fiables de evolución climática. De todos modos, la información disponible de esta fuente no coincide con los parámetros meteorológicos utilizados en el desarrollo de este modelo de previsión de fallas, de manera que para aprovechar tal información éste tendría que ser previamente modificado.

El desarrollo de una herramienta competente para prever fallas como ésta podría tener un importante impacto en la gestión de patrimonios, apoyando a la construcción de estrategias de rehabilitación a largo plazo.

Por último resulta muy importante destacar la aplicabilidad de esta misma metodología de trabajo a otros casos: redes pertenecientes a otras ciudades y también otros tipos de redes. Debe contarse con un registro de datos meteorológicos que permita representar el clima de un lugar en un determinado período de tiempo y por otra parte un registro de fallas acorde al cual relacionar con la estacionalidad climática.

*Agradecimientos.* David Poinard (Veolia Eau), Jean-Baptiste Aubin (I.N.S.A. Lyon) y Samuela Leoni (I.N.S.A. Lyon).

## REFERENCIAS

- Babovic, V., Drécourt, J.P., Keijzer, M. and Hansen P.F., 2002. *A data mining approach to modeling of water supply assets*, Urban Water, (4), pp. 401-414.
- Benoit, C., modificado y traducido por Trivisonno, F., 2011. *Influence of weather on water pipe failures and possible consequences of climate change: case of the Greater Lyon*, PIRD, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Fuchs-Hanusch, D., Friedl, F., Kogseder, B., 2011. *Effect of Seasonal Climatic Variance on Water Main Failures in Moderate Climate Regions*, LESAM 2011: Strategic Asset Management of Water and Wastewater Infrastructure, Mülheim an der Ruhr (Alemania), Septiembre 27-30, 2011, Actas en CD-Rom.
- Gould, S., Boulaire, F., Marlow, D. and Kodikara, J., 2009. *Understanding how the Australian climate can affect pipe failure*, [en línea], disponible en:  
<<http://www.eng.monash.edu.au/civil/assets/document/research/centres/mapps/pb6.pdf>>
- Habibian, A., 1994. *Effect of temperature changes on water-main breaks*, Journal of transportation engineering, 120(2).
- Kleiner, Y. and Rajani, B.B., 2000. *Considering time-dependent factors in the statistical prediction of water main breaks*, American Water Works Association: Infrastructure Conference, 12 p.



- Le Gauffre, P., Haidar, H., Poinard, D., 2008. *Assessing the benefits of rehabilitation programs defined with the CARE-W decision support system*, Water Asset Management International, Marzo 2008, 4(1), pp. 15-18.
- Poinard, D., 2006. *Modèles pour la conception de stratégies et de programmes de réhabilitation des réseaux urbains d'eau potable*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- PREPARED, 2009. *Annex I: Description of Work*, Project document submitted to the 7<sup>th</sup> European research framework program (FP7).
- Rajani, B., Zhan, C. and Kuraoka, S., 1996. *Pipe-soil interaction analysis of jointed water mains*, Canadian Geotechnical Journal, (33), pp. 393-404.