



Universidad
Nacional de
Rosario



Facultad de
Ciencias Exactas,
Ingeniería y
Agrimensura



Escuela de
Ingeniería
Civil

Efectos estacionales del clima sobre fallas en conductos de redes troncales de agua potable: caso del Gran Lyon (Francia)

**Franco
Trivisonno**

trivisonno.franco@gmail.com



19 de junio de 2012

Efectos estacionales del clima sobre fallas en conductos de redes troncales de agua potable: caso del Gran Lyon (Francia)

1 → INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

2 → ANTECEDENTES SOBRE LA INFLUENCIA DEL CLIMA EN LOS CONDUCTOS

3 → DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y DEL PATRIMONIO INHERENTE

4 → PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS Y DE FALLAS

5 → ESTACIONALIDAD Y DEFINICIÓN DE PERÍODOS DE OBSERVACIÓN CLIMÁTICA

6 → CORRELACIÓN ESTADÍSTICA Y SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS CLIMÁTICOS

7 → DESARROLLO DE UN MODELO EXPLICATIVO

8 → ACTUALIZACIÓN DE LOS DATOS DE FALLAS

9 → EVALUACIÓN DE LOS MODELOS Y ESCENARIOS DE EVOLUCIÓN

10 → CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

Introducción

Un eventual cambio climático podría ser el problema más crítico y desafiante que la comunidad global tenga que afrontar en el siglo XXI

Se plantea preparar los sistemas de distribución de agua potable y de saneamiento de las ciudades para los impactos de las posibles evoluciones climáticas a mediano y largo plazo

Desde este estudio se trata de prever las fallas sobre la red de agua potable de la ciudad a través del desarrollo de un modelo que permita identificar los efectos estacionales de factores climáticos sobre los conductos

Objetivos

Identificar los parámetros meteorológicos causantes de fallas en los conductos de la red, a partir de 17 años de registros meteorológicos y de fallas de conductos

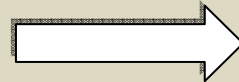
Desarrollar un modelo que permita identificar los efectos estacionales de estos parámetros sobre las fallas

Estimar los impactos de escenarios de evolución de factores climáticos teniendo en cuenta un patrimonio constante

Influencia del clima sobre las fallas de conductos

Factores estáticos:

- Tipo de material
- Diámetro de conducto
- Tipo de suelo
- Etc.



Influyen sobre el deterioro de los conductos

Factores temporales:

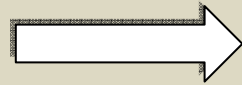
- Temperatura del suelo
- Temperatura del agua
- Etc.



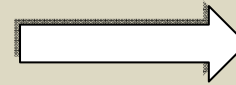
Pueden influenciar la tasa de falla de los conductos

Influencia del clima sobre las fallas de conductos

Caída de temperatura



Contracción impedida del metal



Tensiones de tracción

(Habibian, 1994)

(Babovic *et al.*, 2002)

Incremento de temperatura



Dilatación impedida del metal



Tensiones de compresión

(Rajani *et al.*, 1996)

Influencia del clima sobre las fallas de conductos

CASO DE LYON

- Período 1992-2002
- Conductos bajo calzada
- Fundición gris
- Diámetros < 250 mm

Parámetro meteorológico mensual:
Temperatura mínima absoluta



Explica las variaciones del número anual de fallas un 30 % alrededor de una tendencia lineal de envejecimiento (**+5 %/año**)

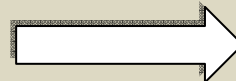
(Poinard,
2006)

Influencia del clima sobre las fallas de conductos

CASO DE ADELAIDA (AUSTRALIA)

- Clima cálido y árido
- Período 1985-1994

Parámetro
meteorológico:
**Déficit de lluvia o
Rain Deficit (RD)**



Cuantifica la humedad
del suelo en función de
la temperatura y de las
precipitaciones

(Kleiner *et al.*,
2000)

Influencia del clima sobre las fallas de conductos

CASO DE OTTAWA (CANADÁ)

•Período 1973-1998



Parámetros:

- Índice de congelamiento o Freezing Index (FI)**
Acumulación de las temperaturas medias diarias $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- CLR (Cumulative Length of Replaced mains)**
Longitud acumulada de la red reemplazada
- CLCP (Cumulative Length of Cathodic Protection)**
Longitud acumulada de red modernizada

(Kleiner *et al.*,
2000)

Influencia del clima sobre las fallas de conductos

Un verano cálido y seco está asociado a una tendencia de **aumento de la tasa de fallas** en la red **durante el invierno siguiente**

Un invierno frío está asociado a una tendencia de **aumento de la tasa de fallas** en red **durante ese mismo invierno**

(Kleiner *et al.*,
2000)

Influencia del clima sobre las fallas de conductos

CASO DE LAS REDES DE AGUA AUSTRÍACAS

•Clima moderado

Parámetros meteorológicos:

•Índice de congelamiento o Freezing Index (FI)

Caracteriza un invierno severo

•Índice de sequedad o Dry Index (DI), o déficit de lluvia o Rain Deficit (RD)

Caracteriza la humedad del suelo

La **ocurrencia de fallas** presenta una buena **correlación** con los **conductos primarios de fundición gris, de pequeños diámetros**

(Fuchs-Hanusch *et al.*,
2000)

Influencia del clima sobre las fallas de conductos

CASO DE LYON (2)

•Período 1993-2010

Parámetros meteorológicos mensuales:

- Temperatura media mínima
- Temperatura máxima absoluta
- Precipitación total
- Cantidad mensual de días consecutivos con precipitación total < 1 mm

RECM total = 6,248 fallas

(Benoit,
2011)

Ciudad de Lyon

480 660 habitantes (2007)

Tercera ciudad más poblada de Francia, luego de París y Marsella

Segunda área urbana del país con **2 118 132** habitantes

Capital del departamento **Ródano** y de la región **Ródano-Alpes**



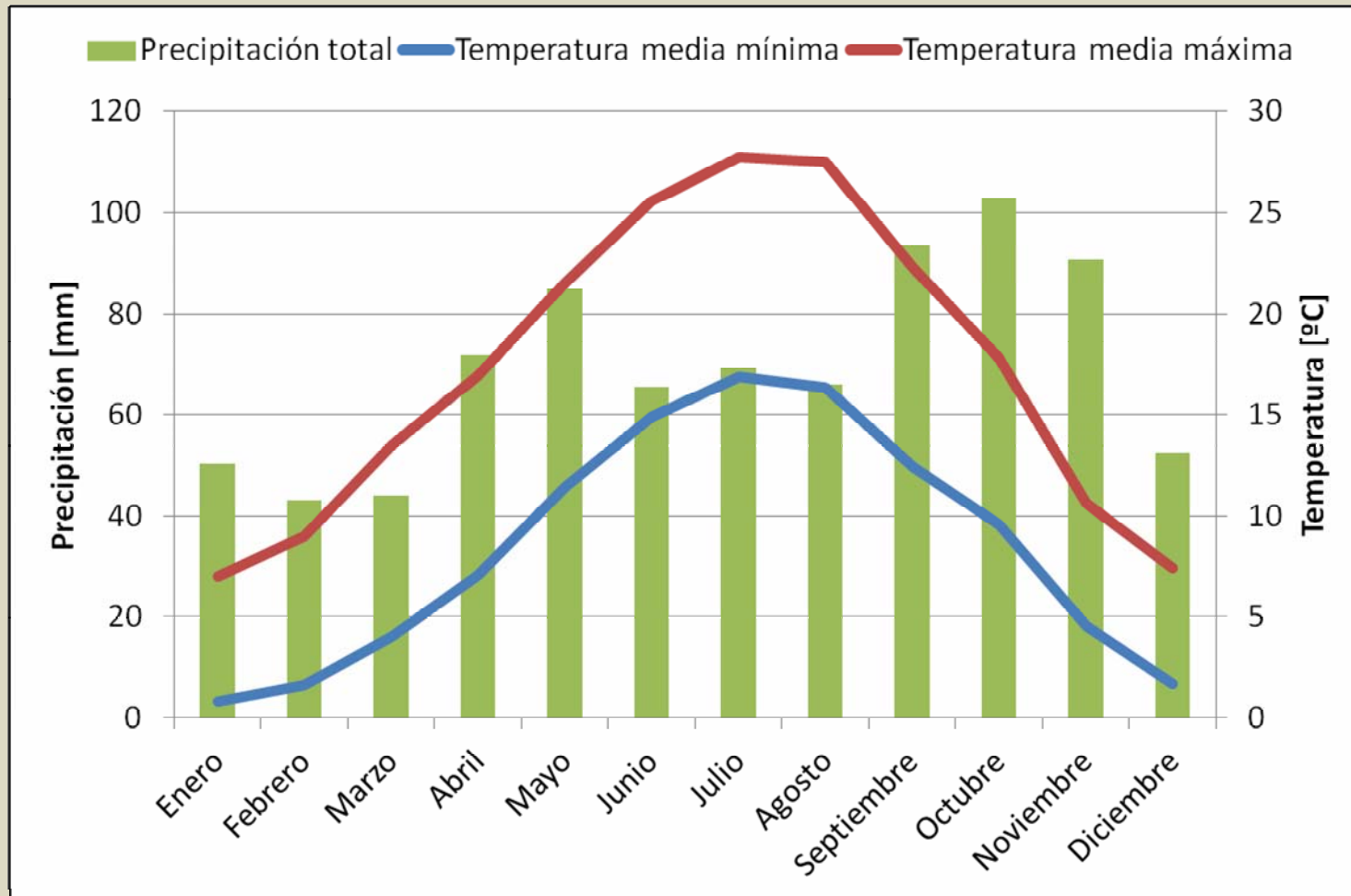
Ciudad de Lyon

Situada al este de Francia, en la confluencia de los ríos **Saona** y **Ródano**

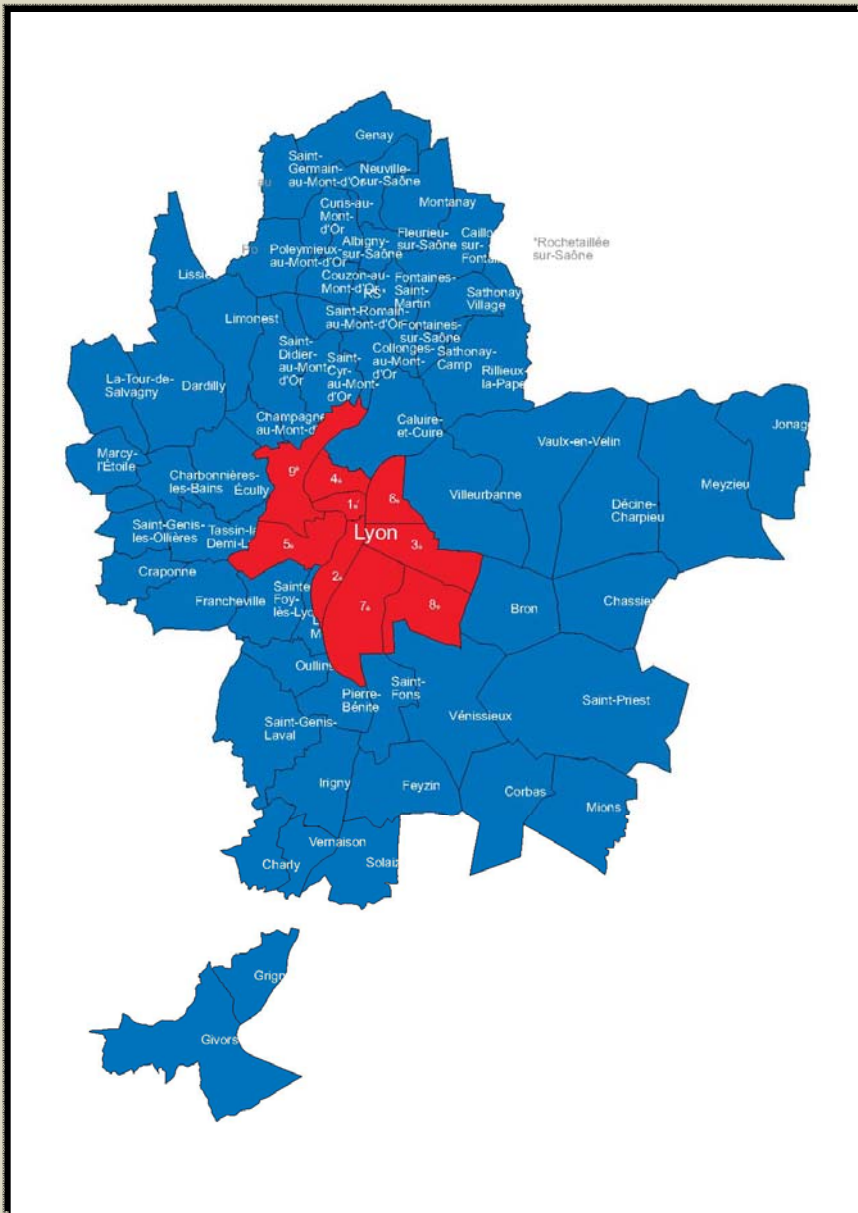
Ubicada entre los **Alpes**, al este, y el **Macizo Central**, al oeste

Ciudad de Lyon

CLIMOGRAMA



El Gran Lyon



Comunidad urbana

Estructura administrativa intercomunal

Agrupación de **58 comunas** de la aglomeración de **Lyon**, situadas en el departamento del **Ródano**

GRAND LYON
communauté urbaine

El Gran Lyon

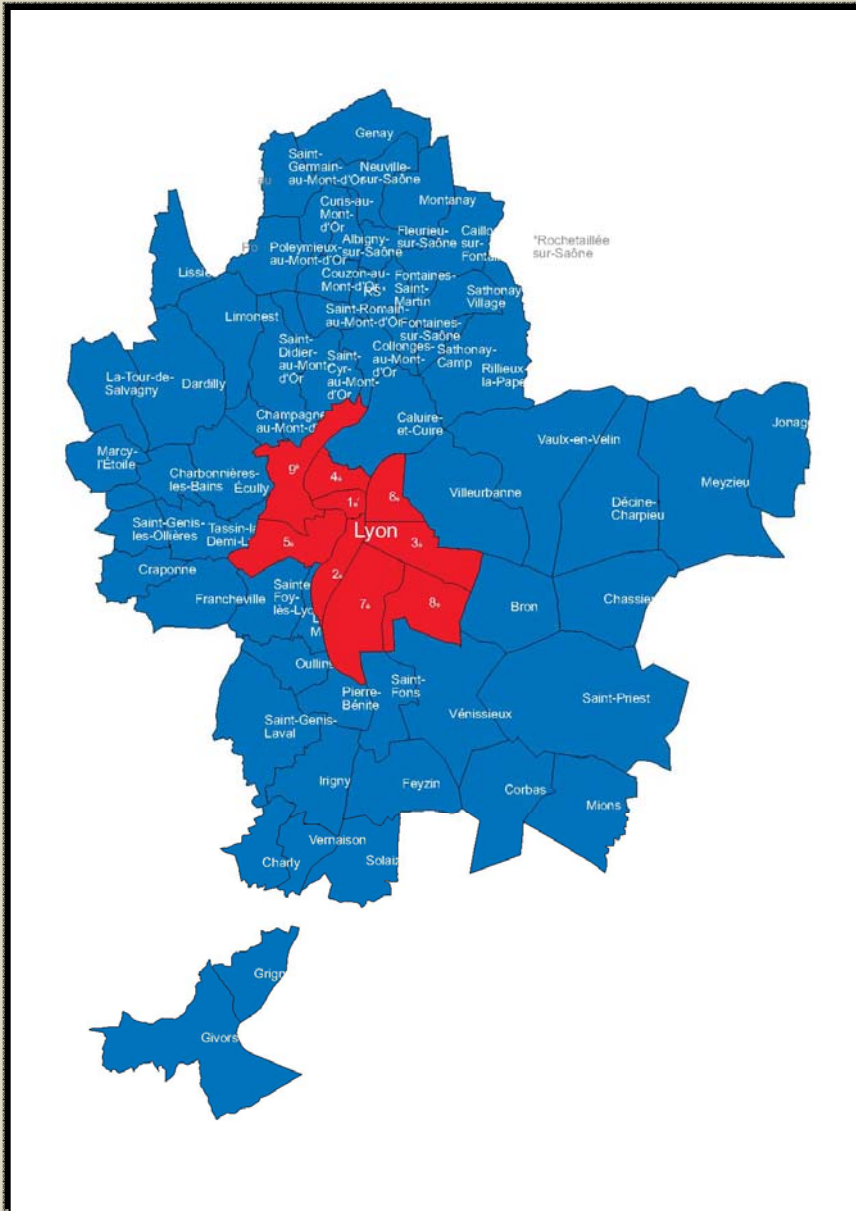
Distribución de agua potable



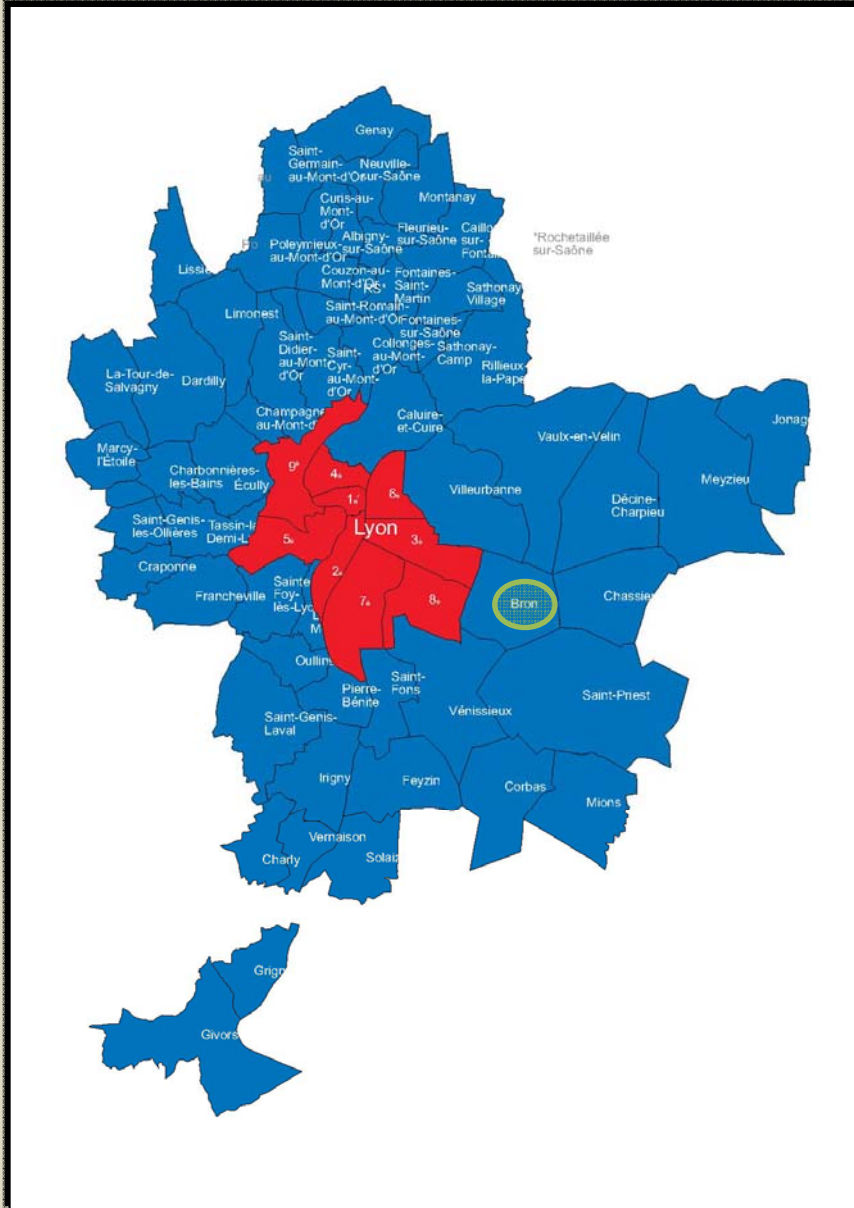
Gestiona aproximadamente el **75 %** de la red



Gestiona el resto de la red

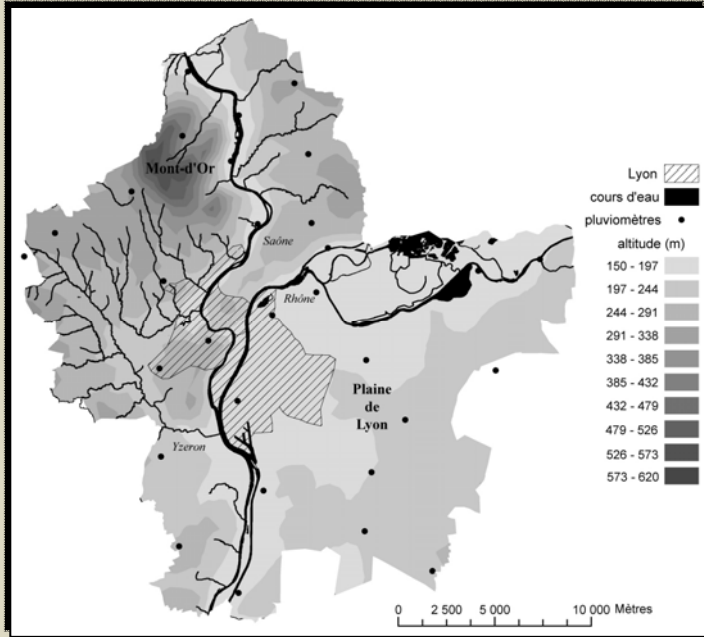


El Gran Lyon



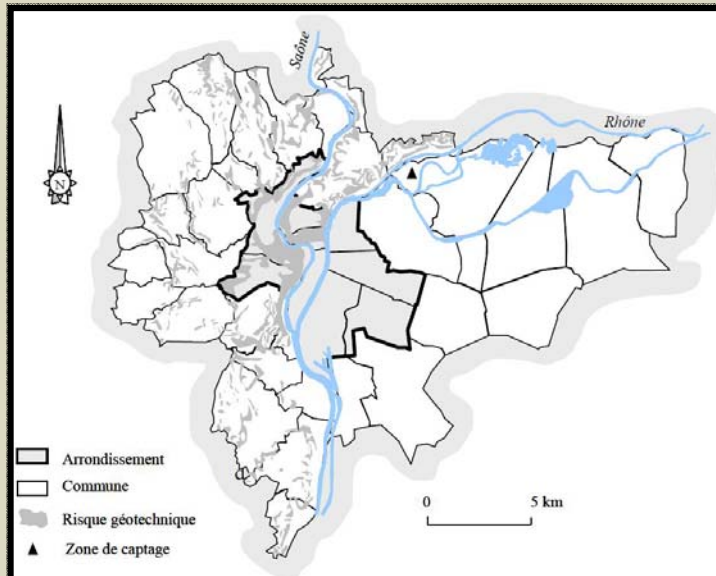
**Estación
meteorológica en la
comuna de Bron**

El Gran Lyon



GRAND LYON
communauté urbaine

Dispose de **32 pluviómetros**



27 pluviómetros ubicados dentro de la zona servida por Veolia Eau

Datos meteorológicos

Estacionalidad



Variables acumulables

Estación meteorológica
Météo France en Bron

- Registros mensuales
- Período enero 1993-
diciembre 2010



- Temperatura media mínima [°C]
- Temperatura mínima absoluta [°C]
- Temperatura media máxima [°C]
- Temperatura máxima absoluta [°C]
- Duración de congelamiento [h]
- Período de fuerte calor [h]
- Duración de luz solar (insolación) [h]

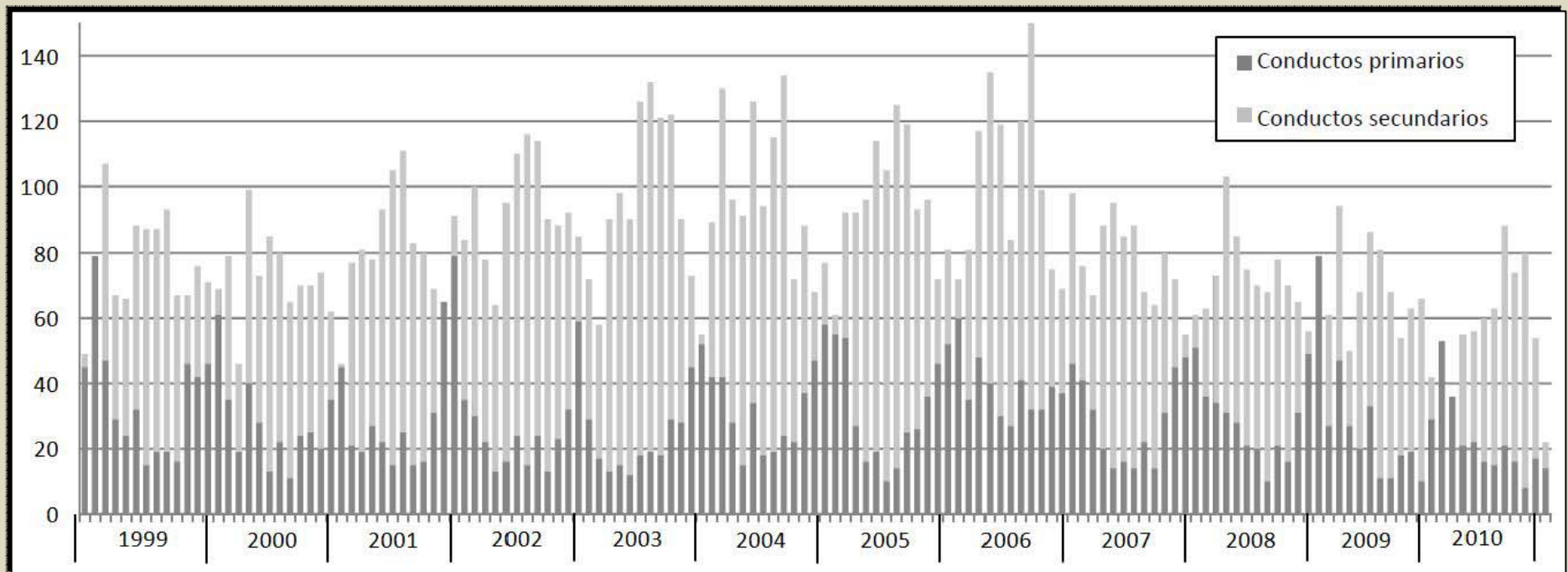
Comunidad Urbana del
Gran Lyon

- 27 pluviómetros situados
dentro del área de estudio



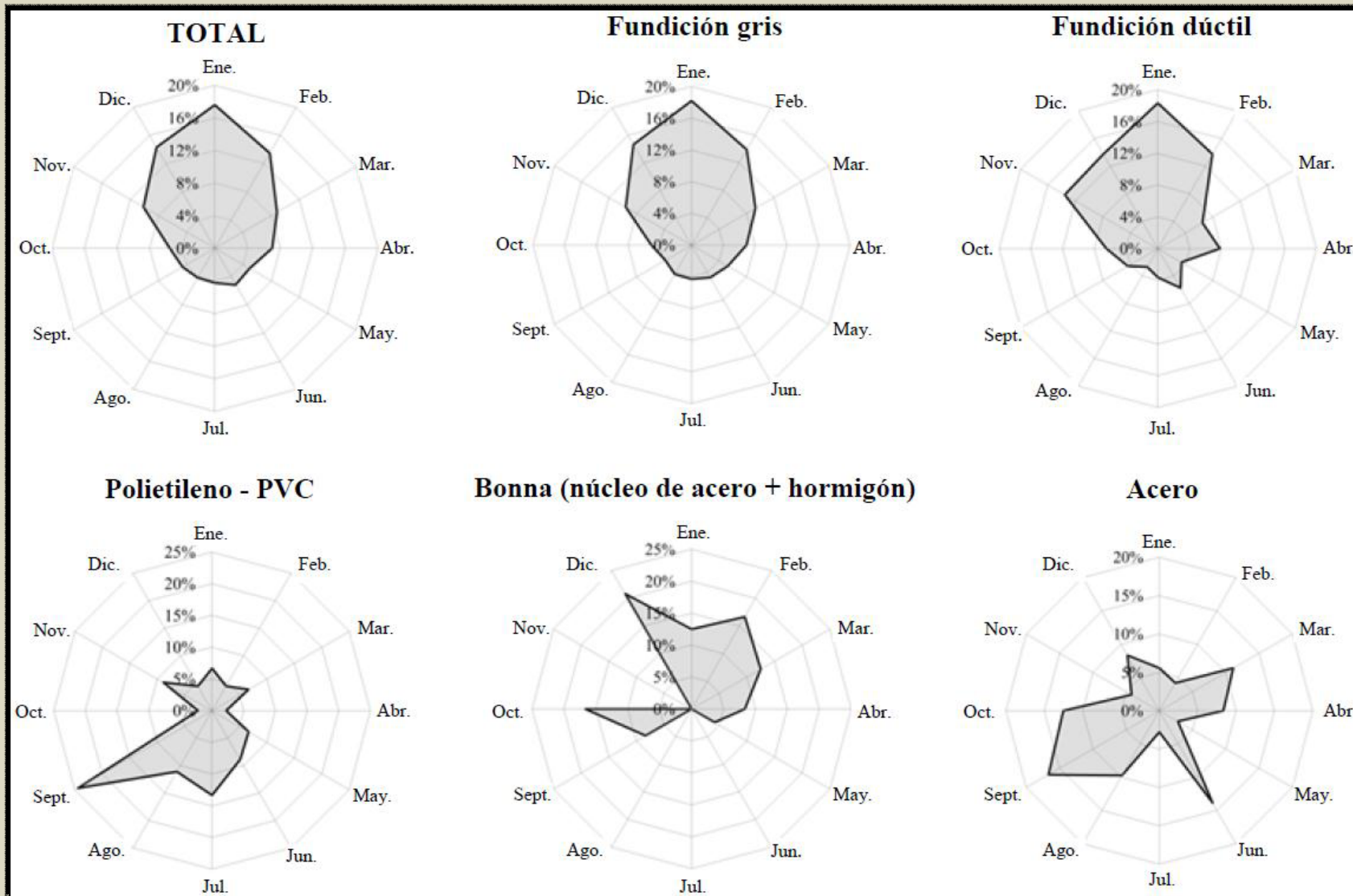
- Precipitación total [mm]
- Precipitación media (sobre el Gran Lyon) [mm]
- Cantidad de días con precipitación media > 1 mm
- Precipitación máxima diaria mensual [mm]
- Cantidad mensual de días consecutivos con
precipitación total < 1 mm
- Cantidad mensual de días consecutivos con
precipitación total > 1 mm

Análisis sobre una determinada categoría de conductos



Fallas no accidentales ocurridas sobre el **patrimonio entero** durante el **período 1999-2010**

Análisis sobre una determinada categoría de conductos



Conductos primarios

Análisis sobre una determinada categoría de conductos

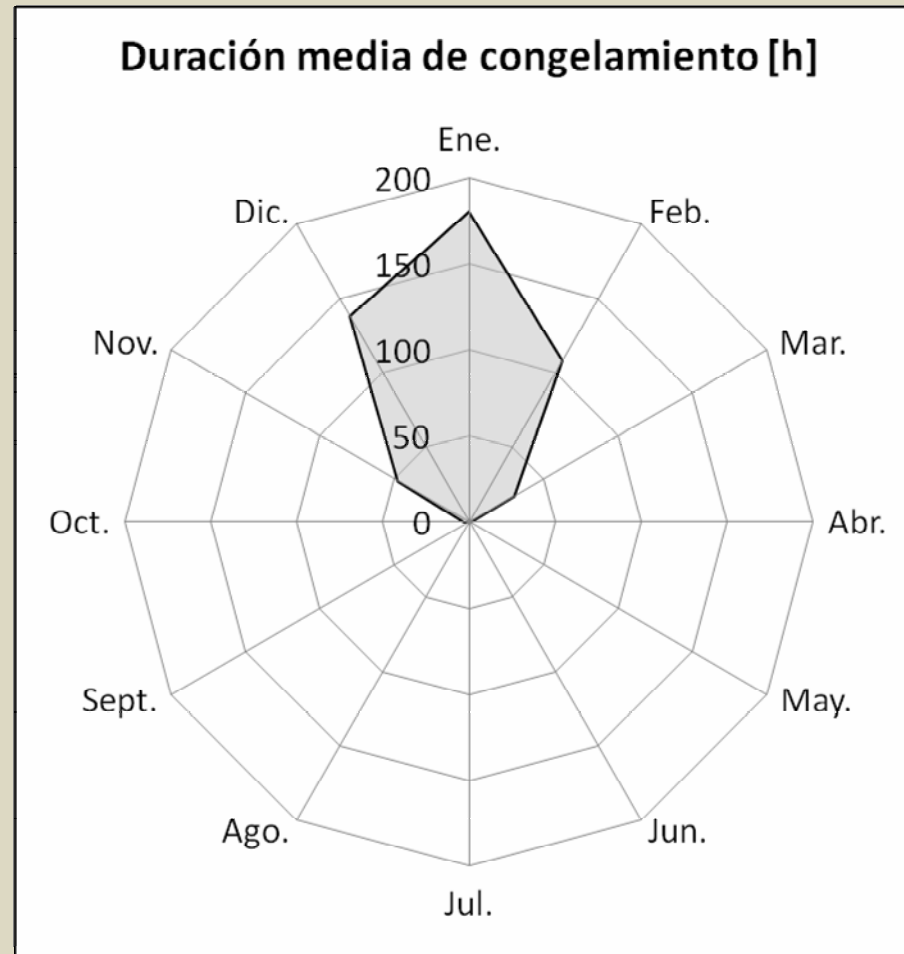
El registro de fallas proviene de Veolia Eau

- Período enero 1993-diciembre 2010
- Conductos primarios
- Fundición gris
- $60 \text{ mm} \leq \text{diámetro} \leq 250 \text{ mm}$
- Conductos bajo calzada
- Fallas que afectan únicamente la integridad estructural de los conductos
- Conductos emplazados antes de 1993 y todavía en servicio en fin del 2010
- Fallas desconocidas contadas como mitad de fallas

11000 conductos que representan 680 Km

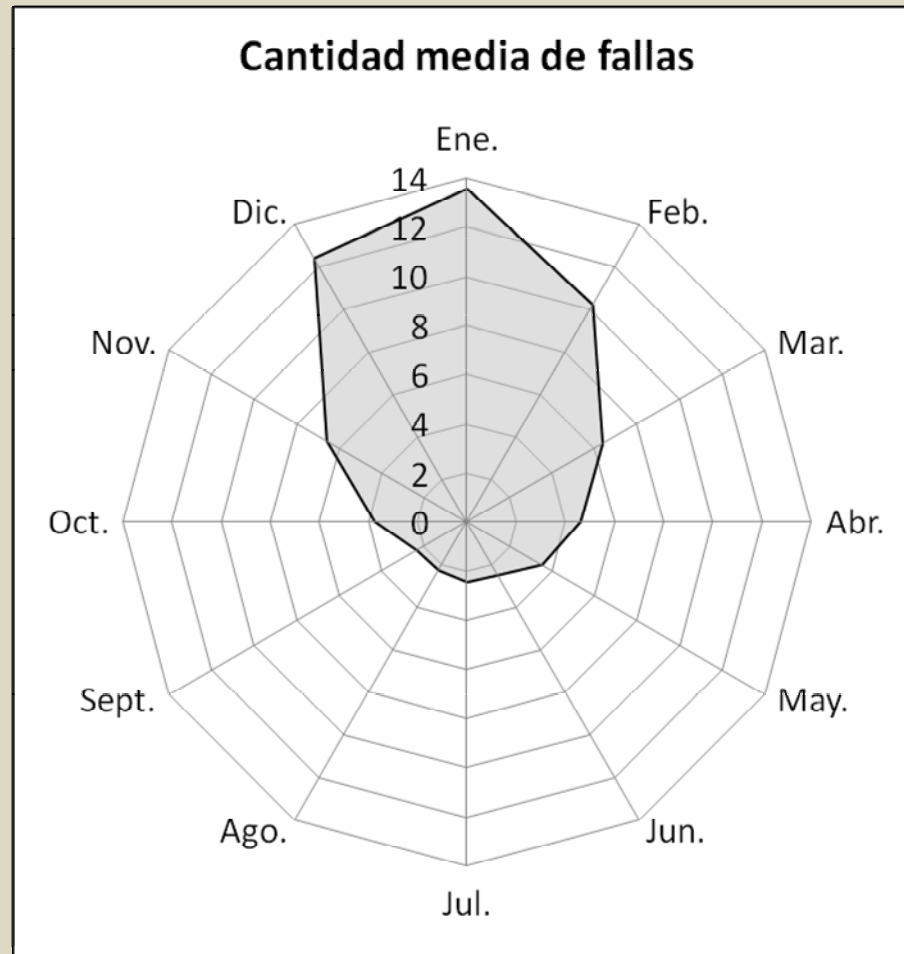
Estacionalidad

El congelamiento es un factor controlador en el proceso invernal causante de fallas en los conductos



Sólo durante el período noviembre-marzo se observa una duración de congelamiento superior a 1 hora

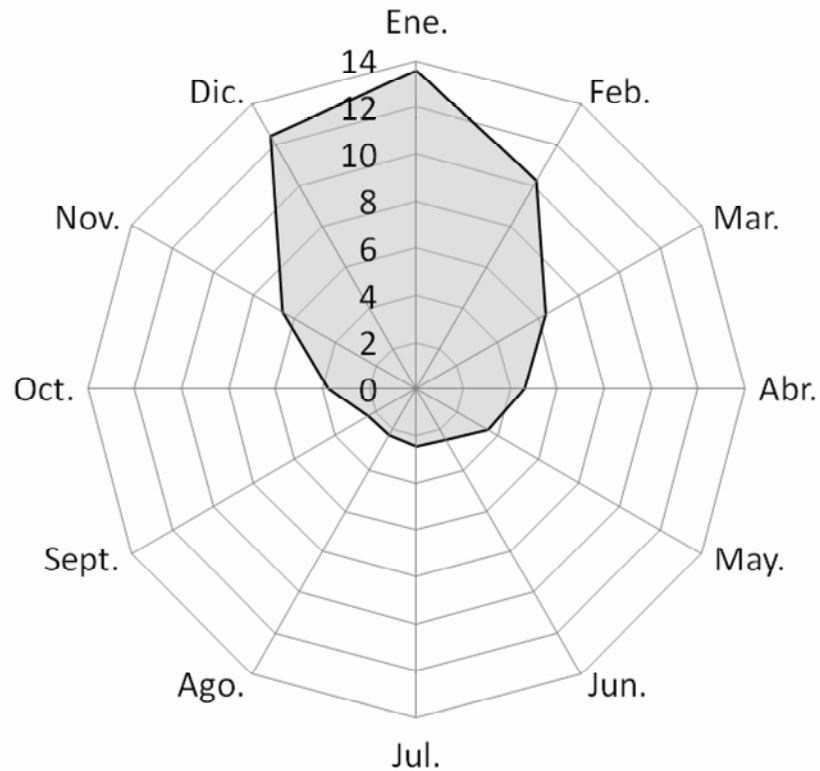
Estacionalidad



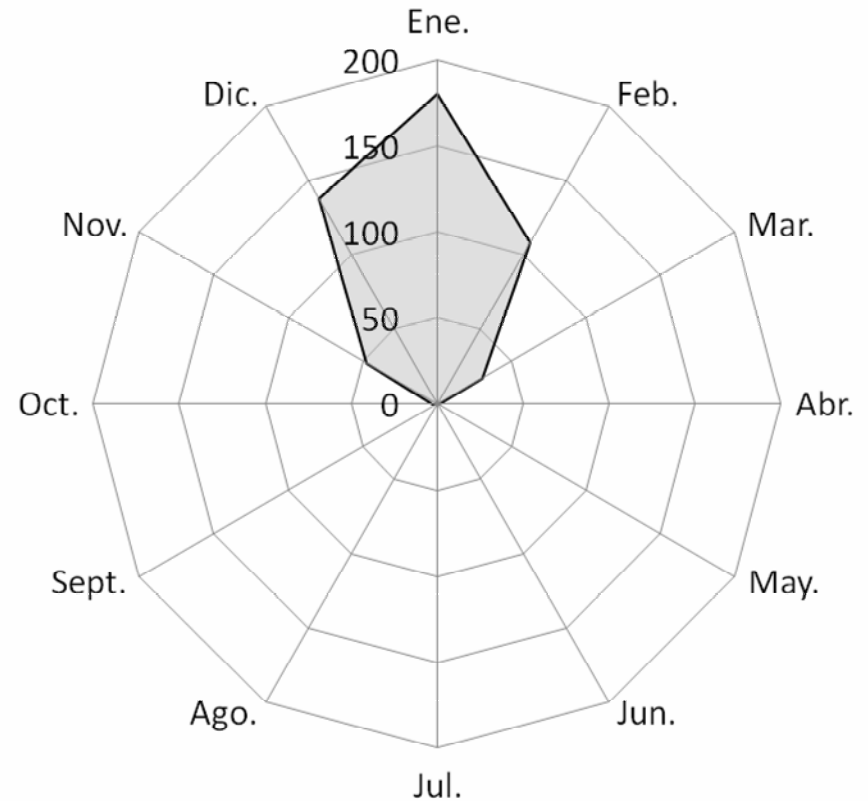
Las fallas se concentran en los meses de invierno

Estacionalidad

Cantidad media de fallas

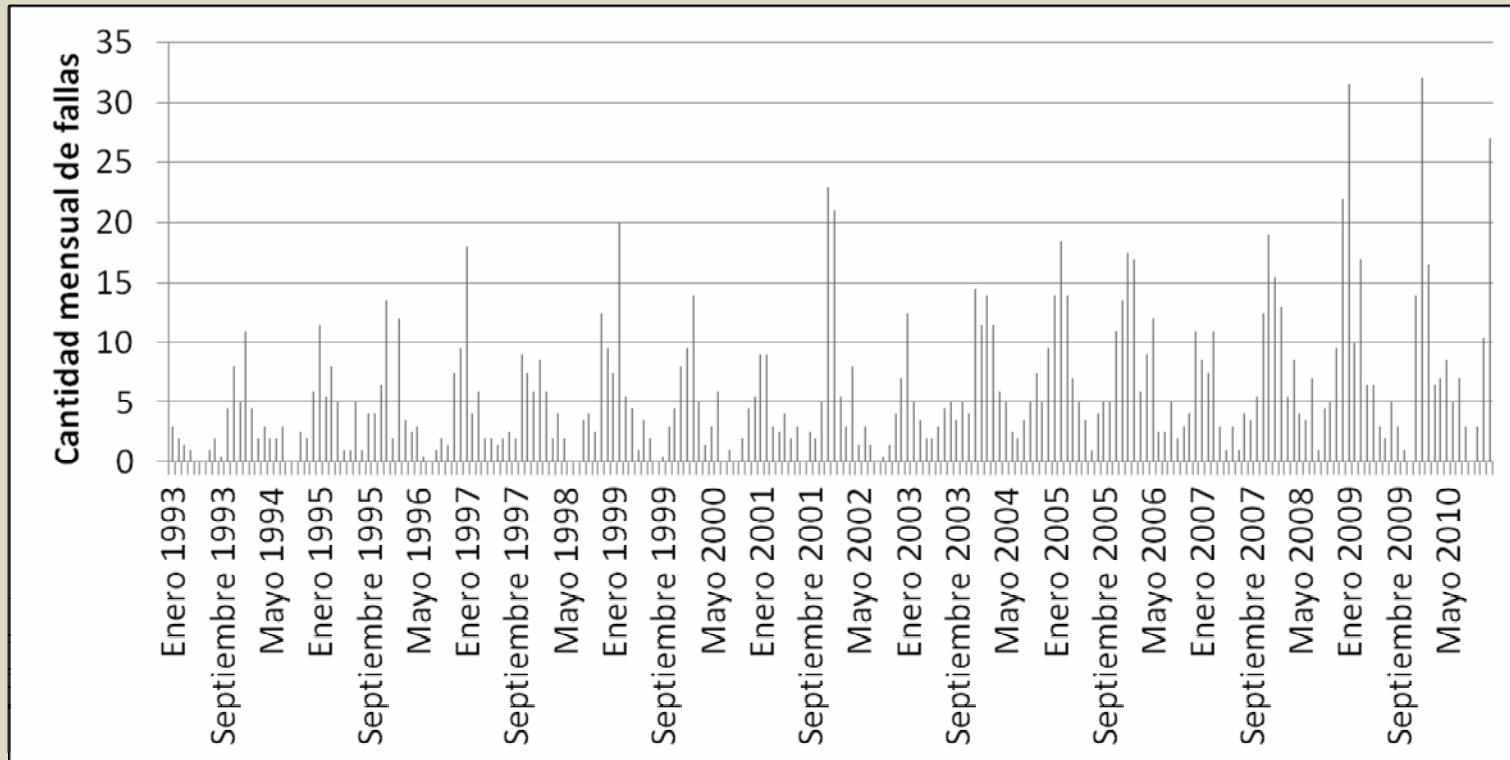


Duración media de congelamiento [h]



Existe una correlación entre el congelamiento y la ocurrencia de fallas

Estacionalidad



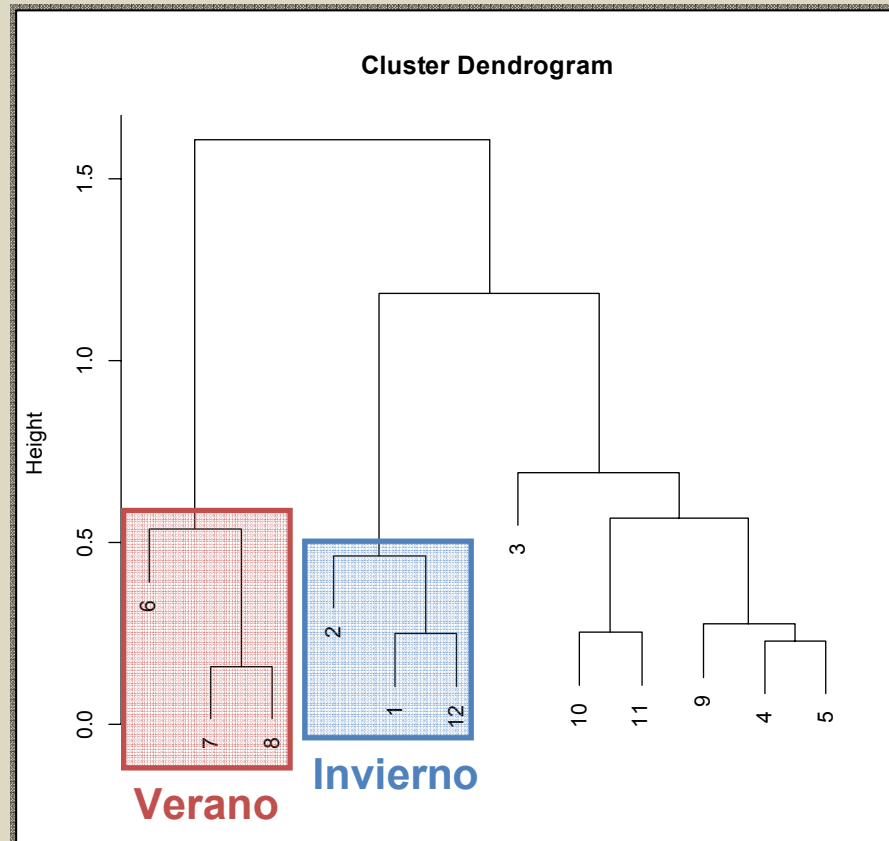
Estas fallas observadas durante los meses de invierno constituyen una parte importante del número anual de fallas

Estacionalidad

No invierno

4	abril
5	mayo
6	junio
7	julio
8	agosto
9	septiembre
10	octubre
11	noviembre
12	diciembre
1	enero
2	febrero
3	marzo

Invierno



Parámetros mensuales:

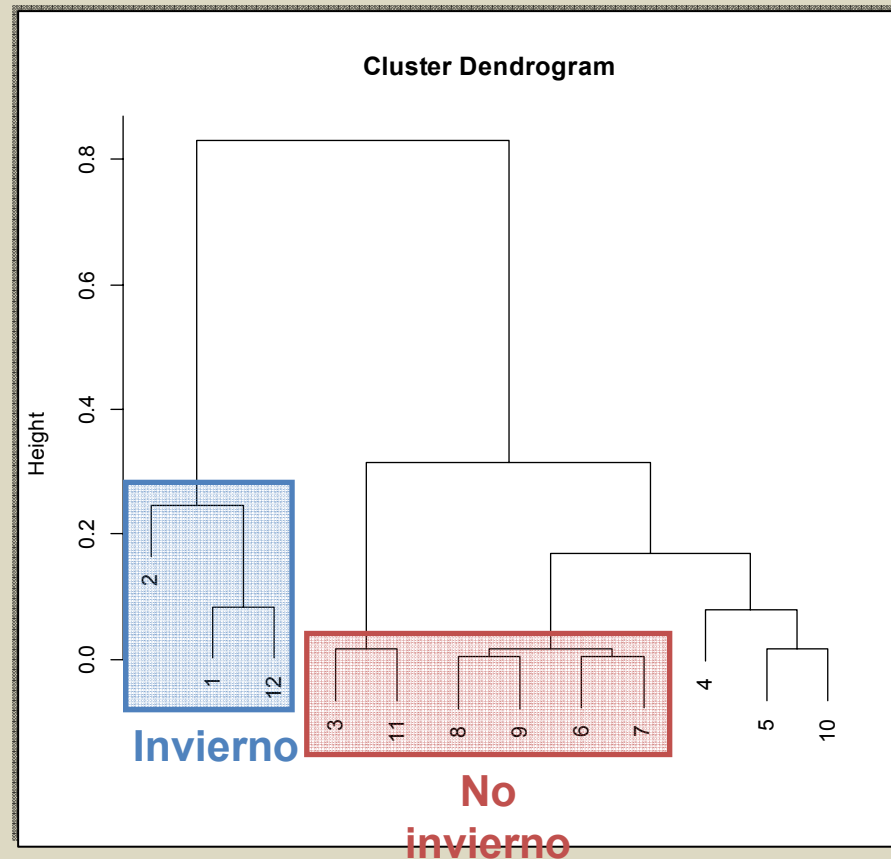
- Duración de congelamiento
- Período de fuerte calor
- Duración de luz solar (insolación)
- Precipitación total
- Cantidad de días con precipitación media > 1 mm

Estacionalidad

No invierno

4	abril
5	mayo
6	junio
7	julio
8	agosto
9	septiembre
10	octubre
11	noviembre
12	diciembre
1	enero
2	febrero
3	marzo

Invierno



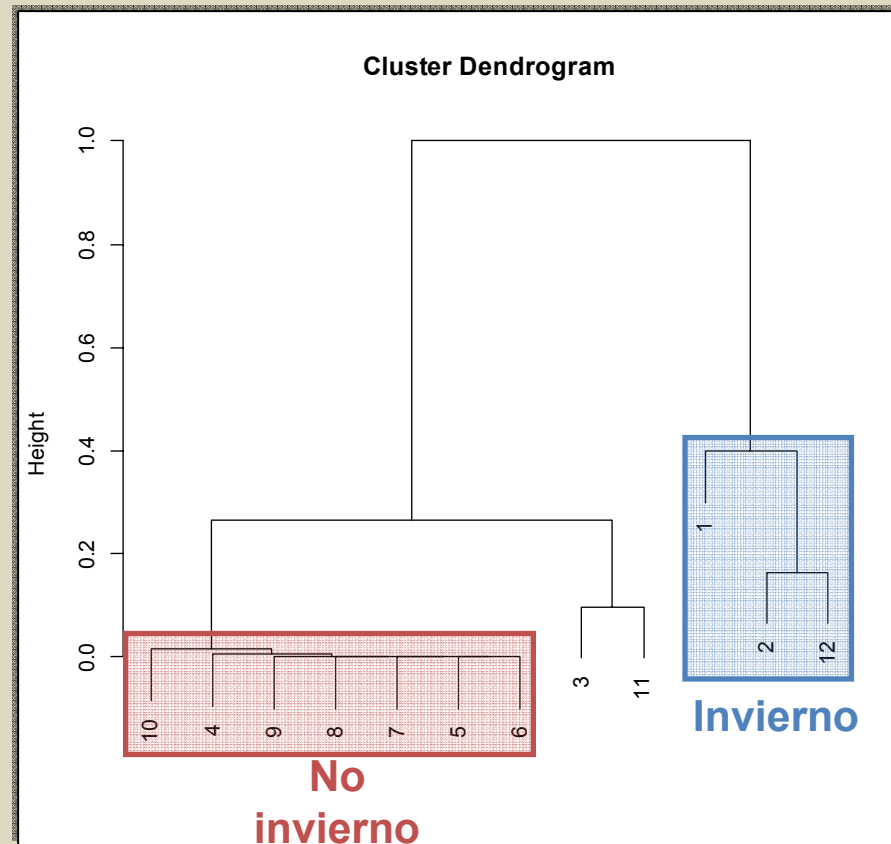
Parámetro mensual:
•Cantidad de fallas

Estacionalidad

No invierno

4	abril
5	mayo
6	junio
7	julio
8	agosto
9	septiembre
10	octubre
11	noviembre
12	diciembre
1	enero
2	febrero
3	marzo

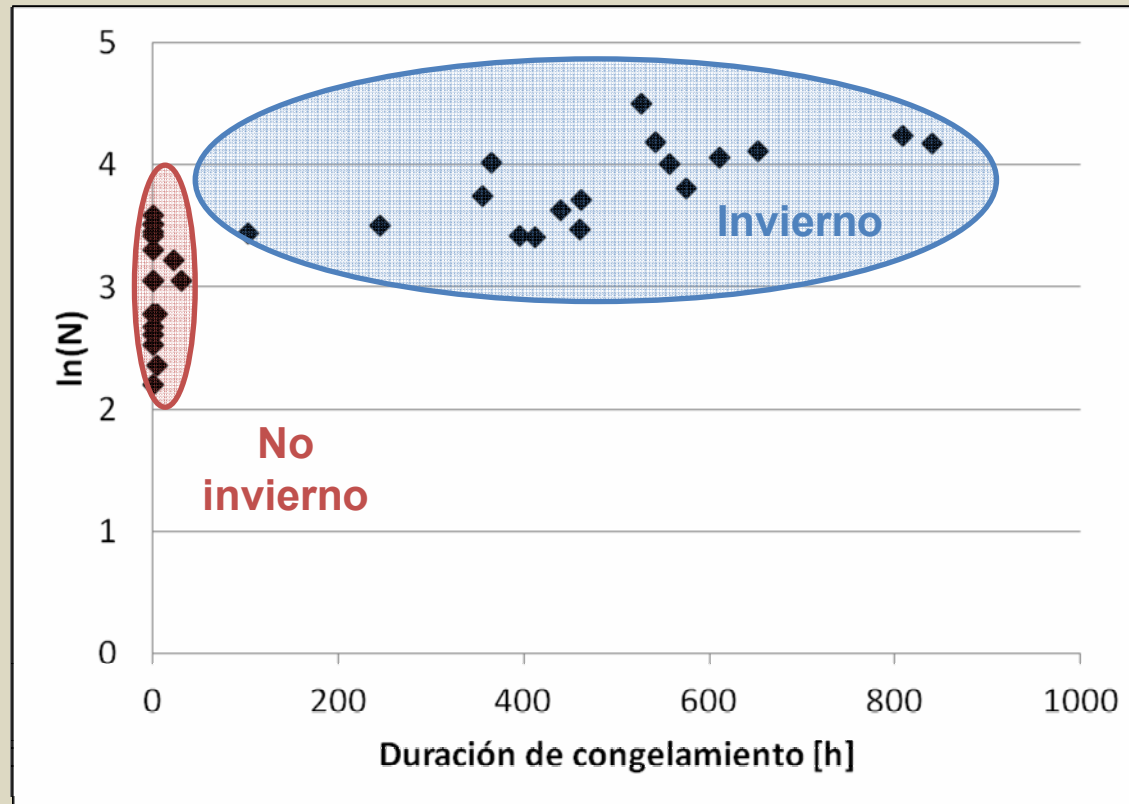
Invierno



Parámetro mensual:
• Duración de congelamiento

Estacionalidad

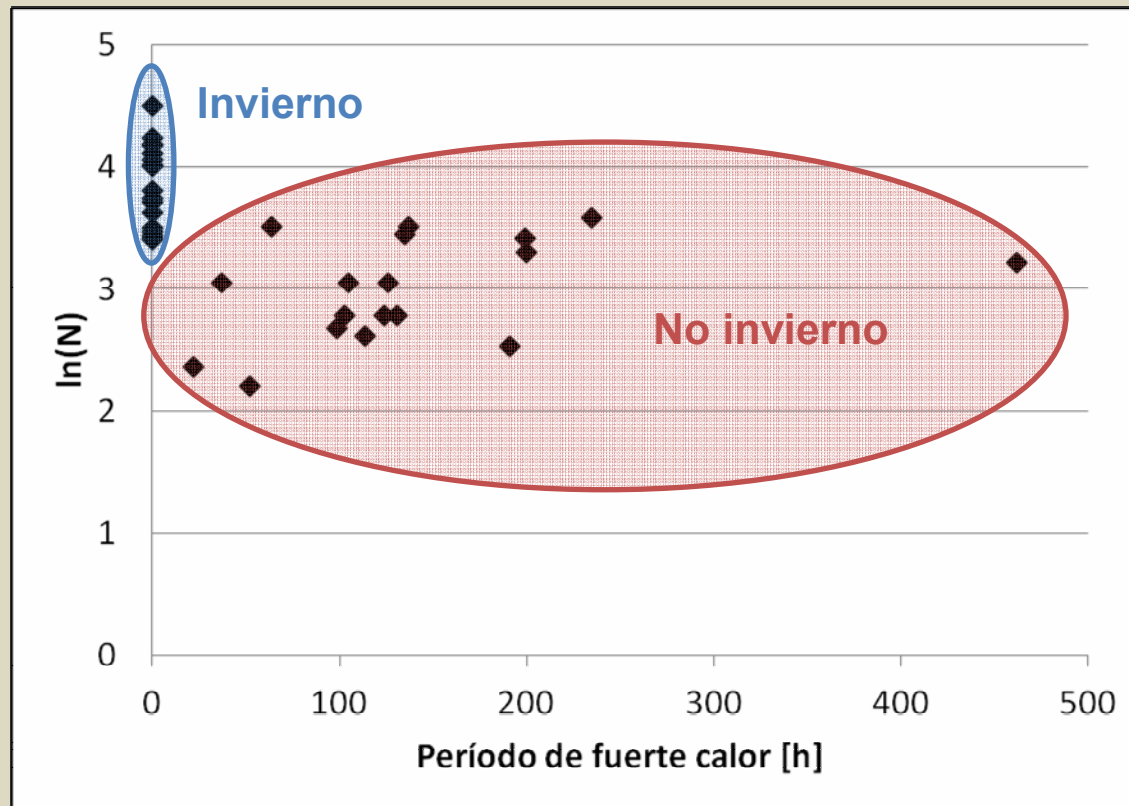
N: cantidad de fallas estacionales (invierno o no invierno)



Correlaciones sin considerar desfases temporales

Estacionalidad

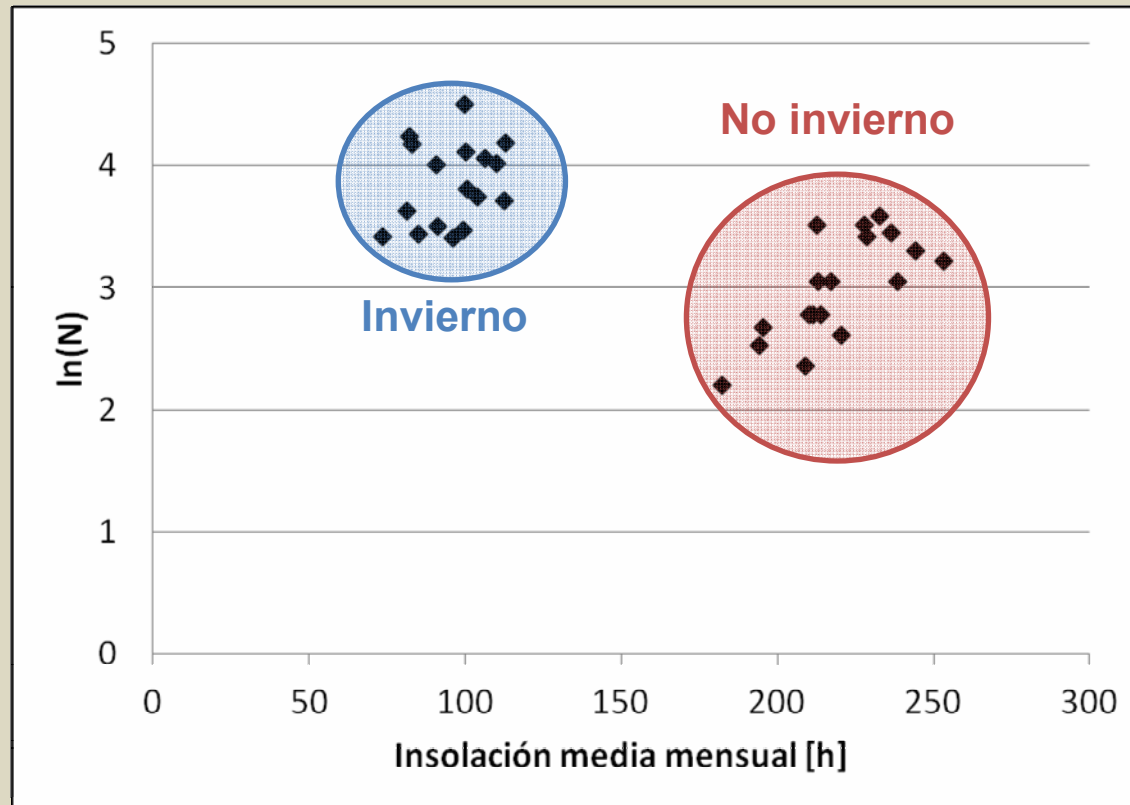
N: cantidad de fallas estacionales (invierno o no invierno)



Correlaciones sin considerar desfases temporales

Estacionalidad

N: cantidad de fallas estacionales (invierno o no invierno)



Correlaciones sin considerar desfases temporales

Factores climáticos sobre fallas de no invierno

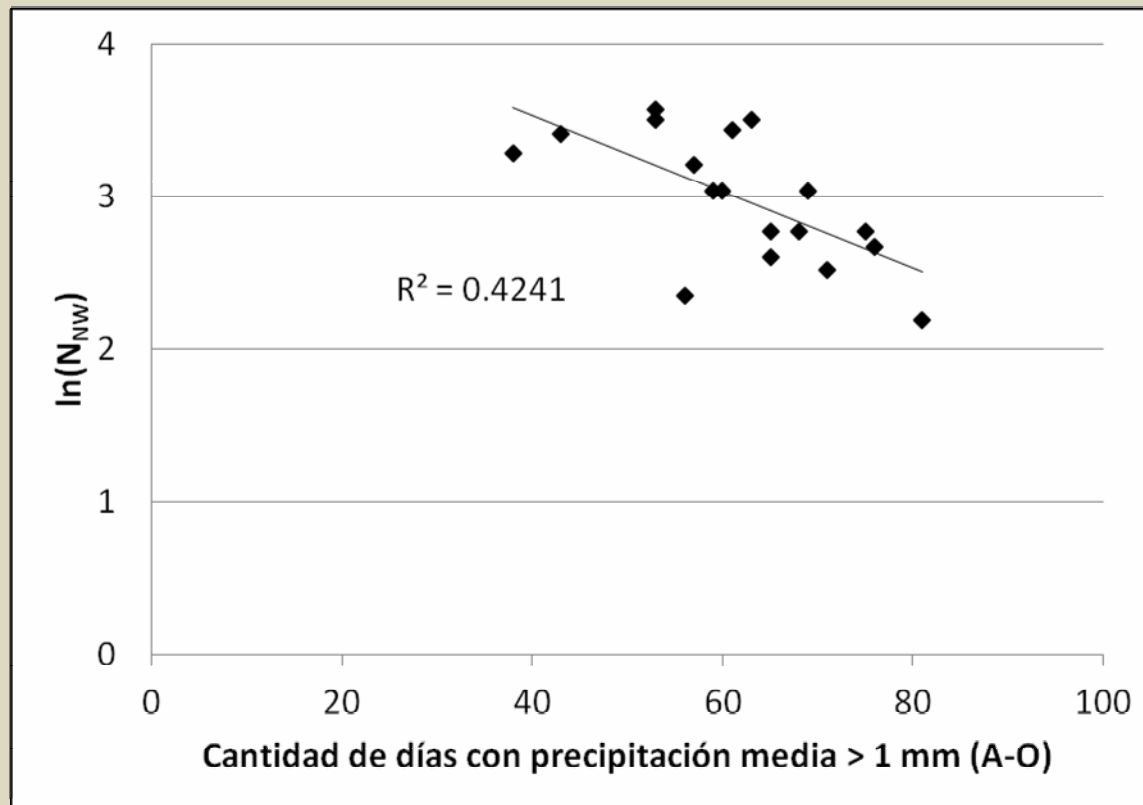
CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

Período	Abril a octubre		Noviembre a octubre		Noviembre a marzo	
	ρ	R^2	ρ	R^2	ρ	R^2
Duración de congelamiento	0,05	0,002	0,47	0,22	0,47	0,22
Período de fuerte calor	0,39	0,153	0,33	0,11		
Insolación	0,73	0,527	0,62	0,38	0,27	0,07
Precipitación total	-0,47	0,219	-0,10	0,01	0,13	0,02
Precipitación media	-0,39	0,153	0,15	0,02	0,38	0,14
Días con precipitación media > 1 mm	-0,65	0,424	-0,35	0,12	0,11	0,01

Factores climáticos sobre fallas de no invierno

CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

N_{NW} : cantidad de fallas de no invierno

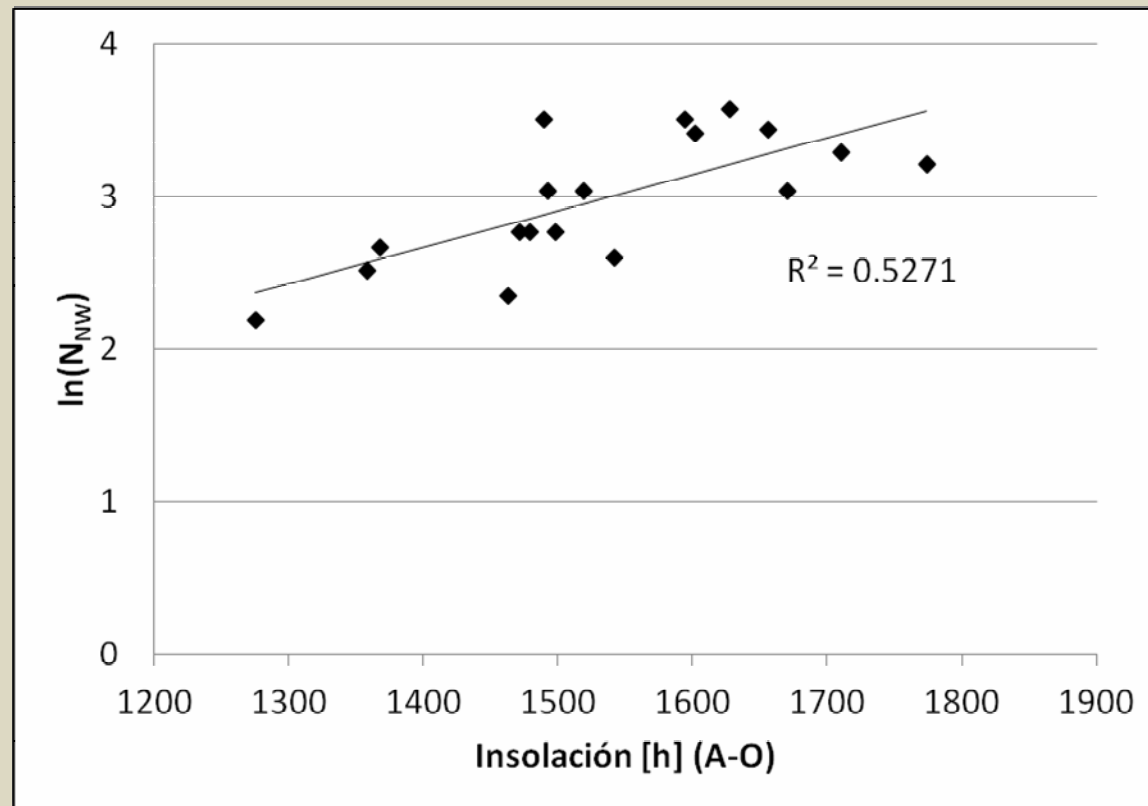


Sin desfase temporal

Factores climáticos sobre fallas de no invierno

CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

N_{NW} : cantidad de fallas de no invierno

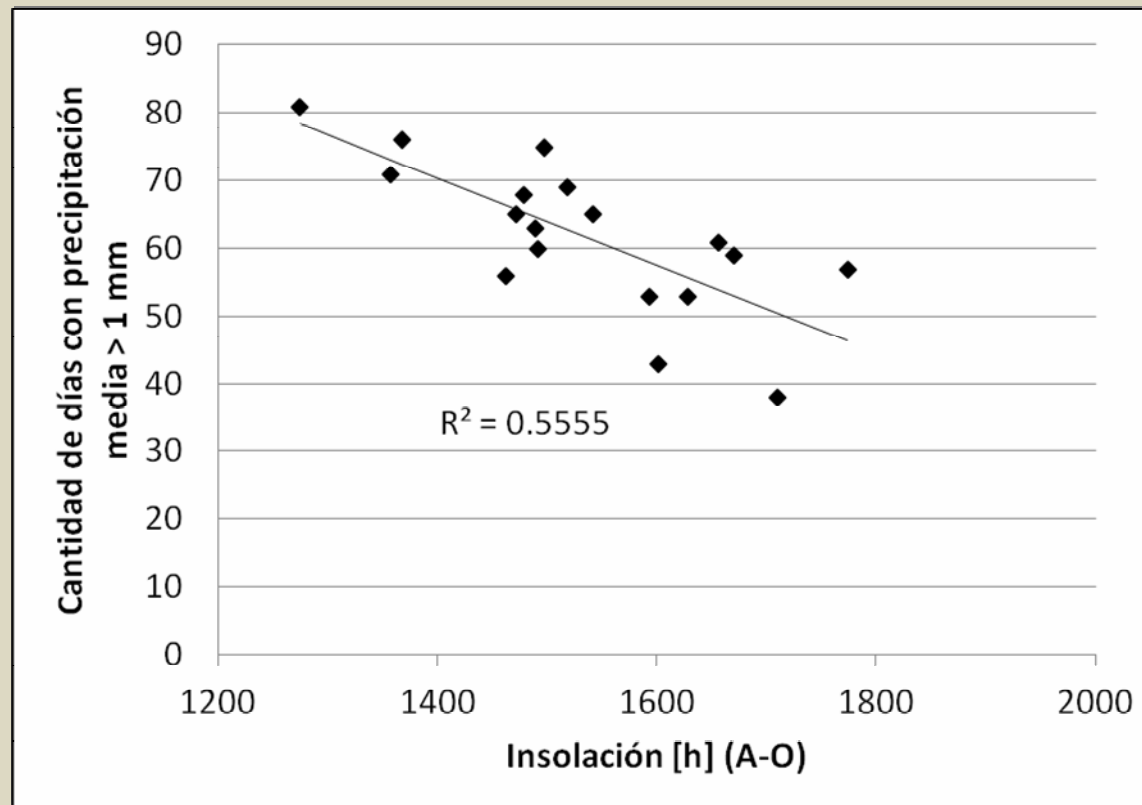


Sin desfase temporal

Factores climáticos sobre fallas de no invierno

CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

Pero existe una correlación entre ellas



Sin desfase temporal

Factores climáticos sobre fallas de invierno

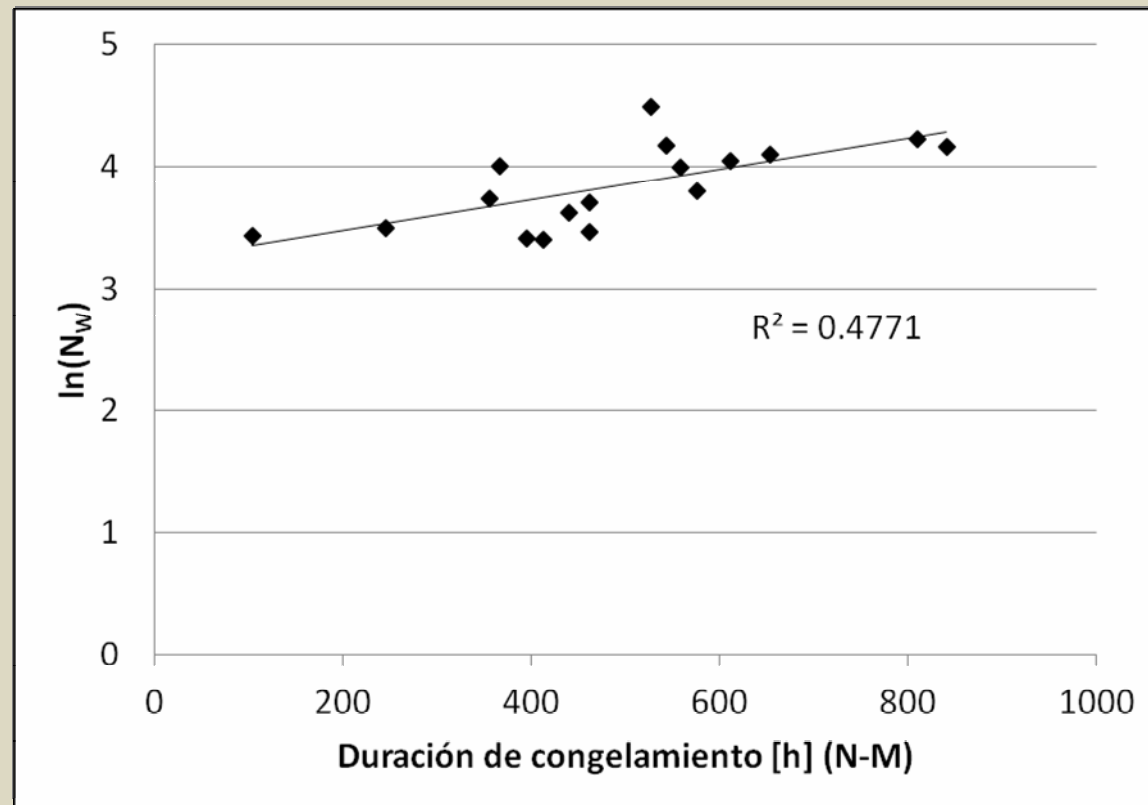
CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

Período	Noviembre a marzo		Septiembre a marzo		Abril a marzo		Abril a octubre	
	ρ	R^2	ρ	R^2	ρ	R^2	ρ	R^2
Duración de congelamiento	0,69	0,48	0,69	0,47	0,69	0,47	-0,18	0,033
Período de fuerte calor			0,16	0,02	0,13	0,02	0,13	0,016
Insolación	0,27	0,08	0,36	0,13	0,42	0,18	0,37	0,137
Precipitación total	-0,34	0,11	-0,40	0,16	-0,30	0,09	-0,13	0,018
Precipitación media	-0,17	0,03	-0,33	0,11	-0,16	0,03	-0,06	0,004
Días con precipitación media > 1 mm	-0,38	0,15	-0,48	0,23	-0,56	0,31	-0,40	0,157

Factores climáticos sobre fallas de invierno

CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

N_w : cantidad de fallas de invierno

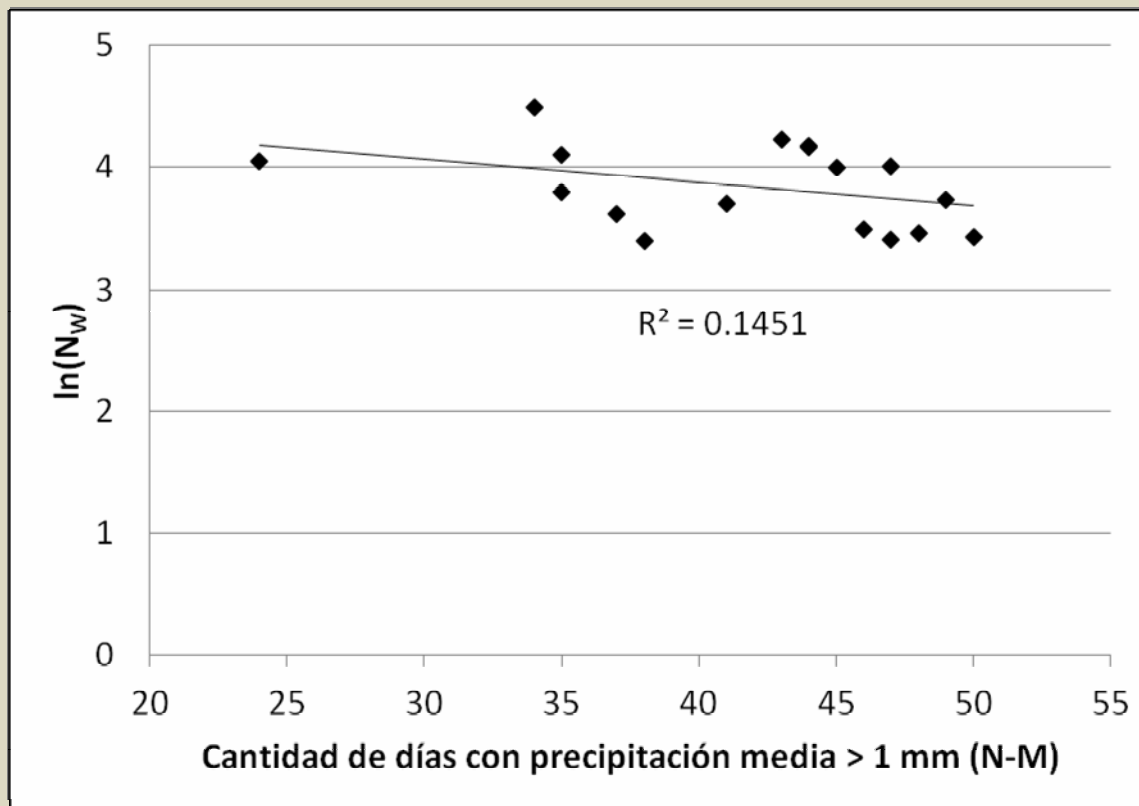


Sin desfase temporal

Factores climáticos sobre fallas de invierno

CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

N_w : cantidad de fallas de invierno

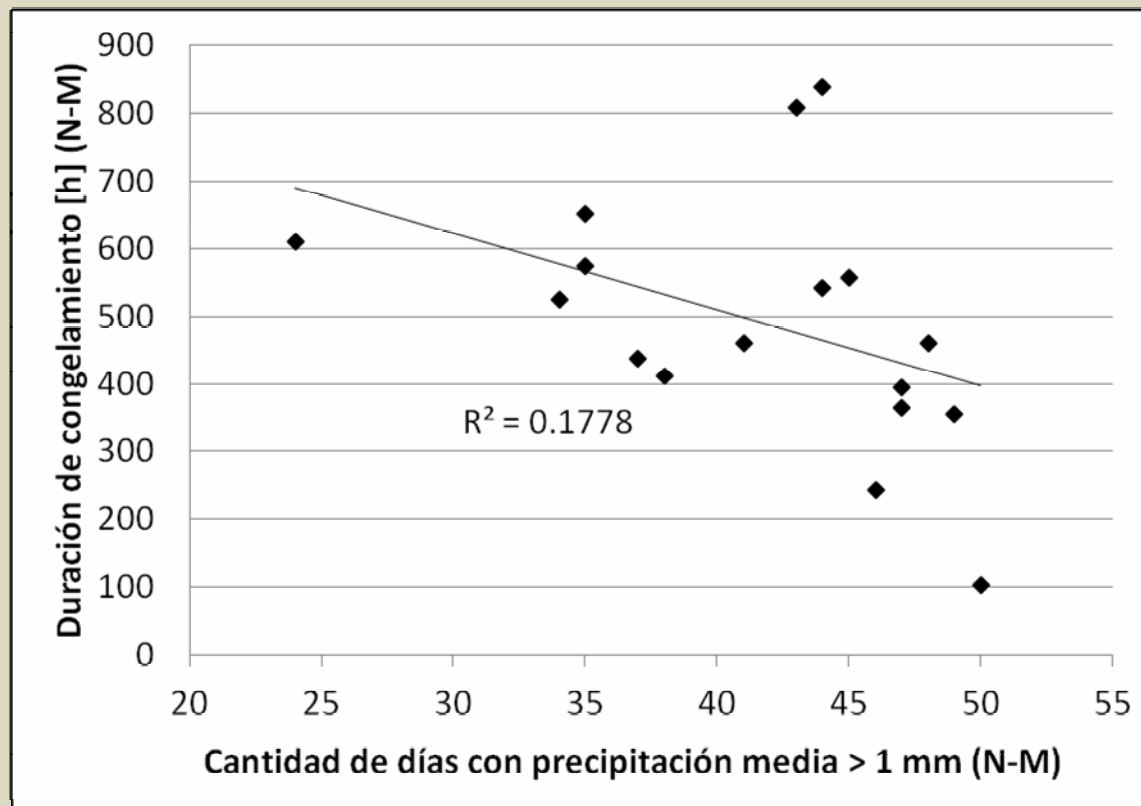


Sin desfase temporal

Factores climáticos sobre fallas de invierno

CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

Pero existe una correlación entre ellas



Sin desfase temporal

Desarrollo de un modelo estacional

Análisis cualitativo de los datos



Se plantea la existencia de una relación logarítmica entre la cantidad de fallas y los factores climáticos

PROPUESTA

El logaritmo natural del número de fallas (N) de un período dado es el resultado de una combinación lineal de variables temporales dependientes explicativas: x_1, x_2, \dots, x_m (e.g., edad del conducto, temperatura, precipitación)

Desarrollo de un modelo estacional

Modelo multivariado temporal exponencial

$$\ln N = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i$$

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

Donde a_0, a_1, \dots, a_m son parámetros que pueden ser encontrados por regresión por mínimos cuadrados o utilizando máxima verosimilitud

Modelo de no invierno

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

N_{NW} → número de fallas de no invierno

x → duración acumulada de la luz solar [h] durante el mismo período de no invierno ($R^2 = 0,53$)

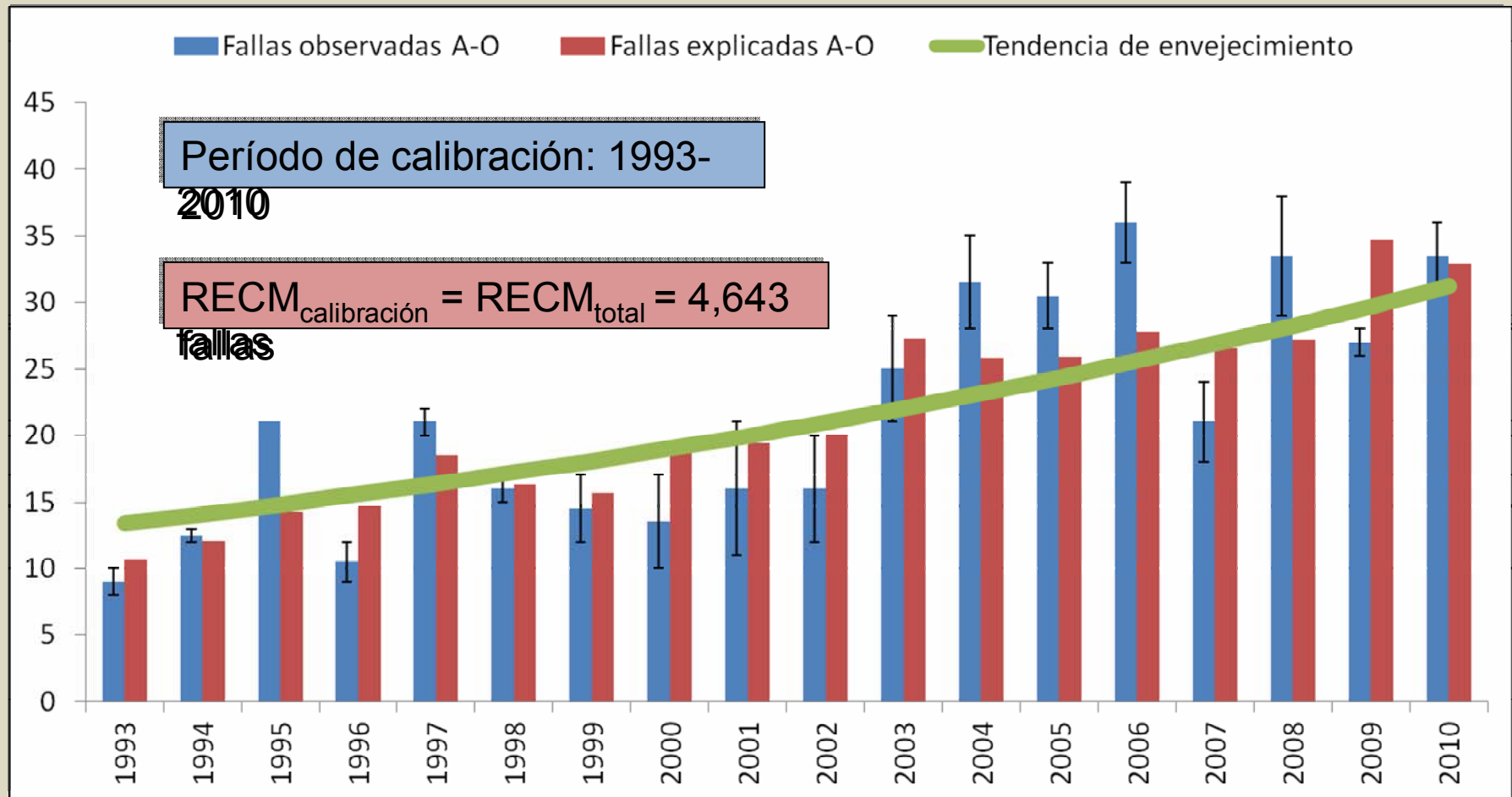
k → tasa anual de crecimiento no lineal para el período de no invierno

n → tiempo transcurrido a partir de un instante inicial [años]

a, b → parámetros constantes relativos al número inicial de fallas y al efecto del factor climático sobre los conductos

Modelo de no invierno

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



Modelo de no invierno

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

**PARÁMETROS DEL
MODELO**

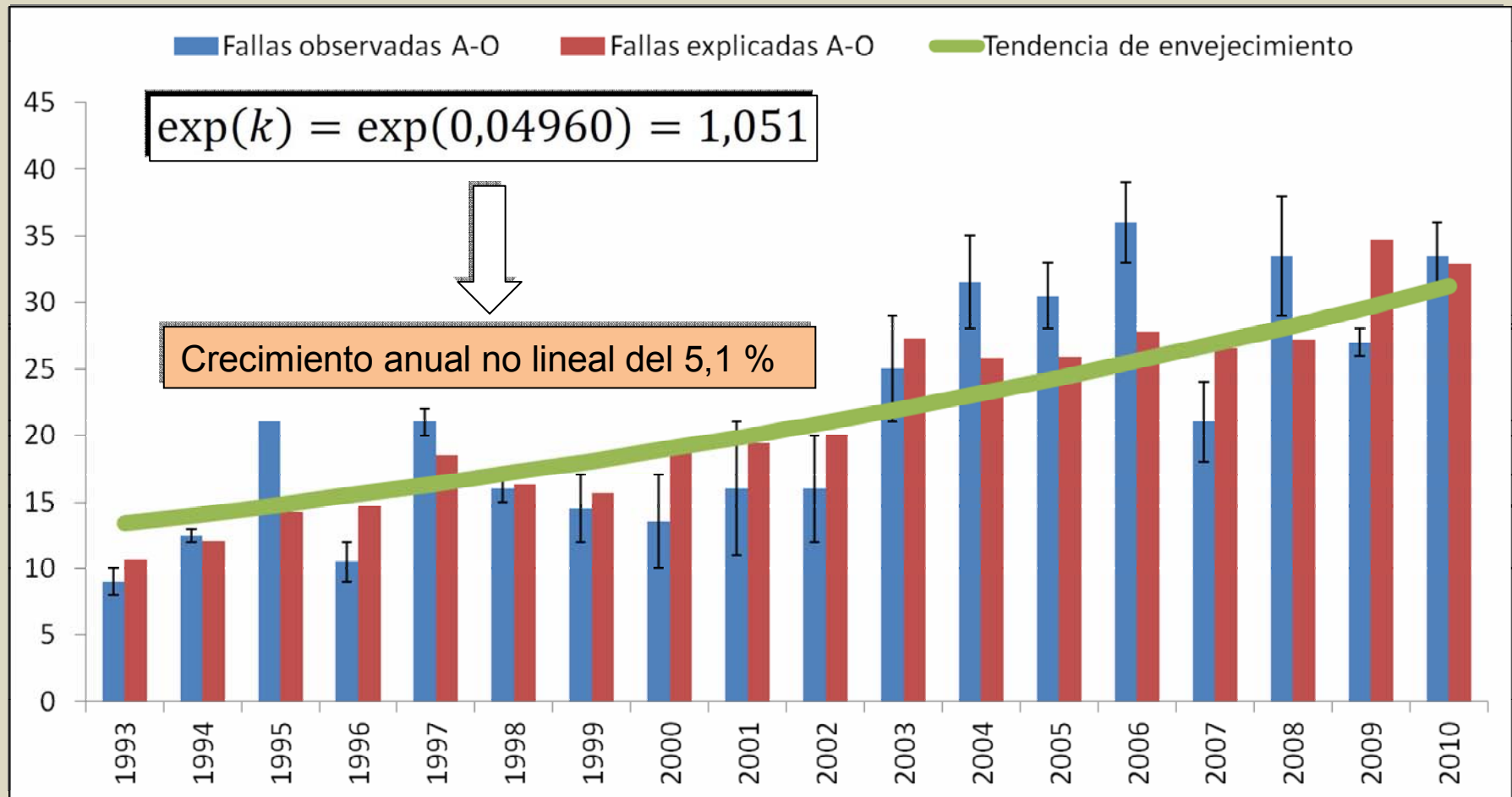
$$a = 1,243$$

$$b = 0,0008835$$

$$k = 0,04960$$

Modelo de no invierno

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



Modelo de no invierno

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

VARIACIONES DEL MODELO

NO INVIERNO	Envejecimiento	Insolación	Envejecimiento e insolación
RECM	5,043	6,771	4,643

Modelo de invierno

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

N_W → cantidad de fallas a ocurrir en el período de invierno

y → duración acumulada de congelamiento [h]
durante el mismo período de invierno ($R^2 = 0,48$)

z → cantidad de días con precipitación media > 1 mm
durante el mismo período de invierno ($R^2 = 0,15$)

q → tasa de crecimiento no lineal anual para el invierno

n → tiempo transcurrido a partir de un instante inicial

c, d, f → parámetros constantes relativos a la cantidad inicial de fallas y el efecto del clima sobre los conductos

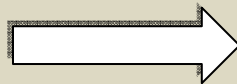
Modelo de invierno

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

N_W → cantidad de fallas a ocurrir en el período de invierno

y → duración acumulada de congelamiento [h]
durante el mismo período de invierno ($R^2 = 0,48$)

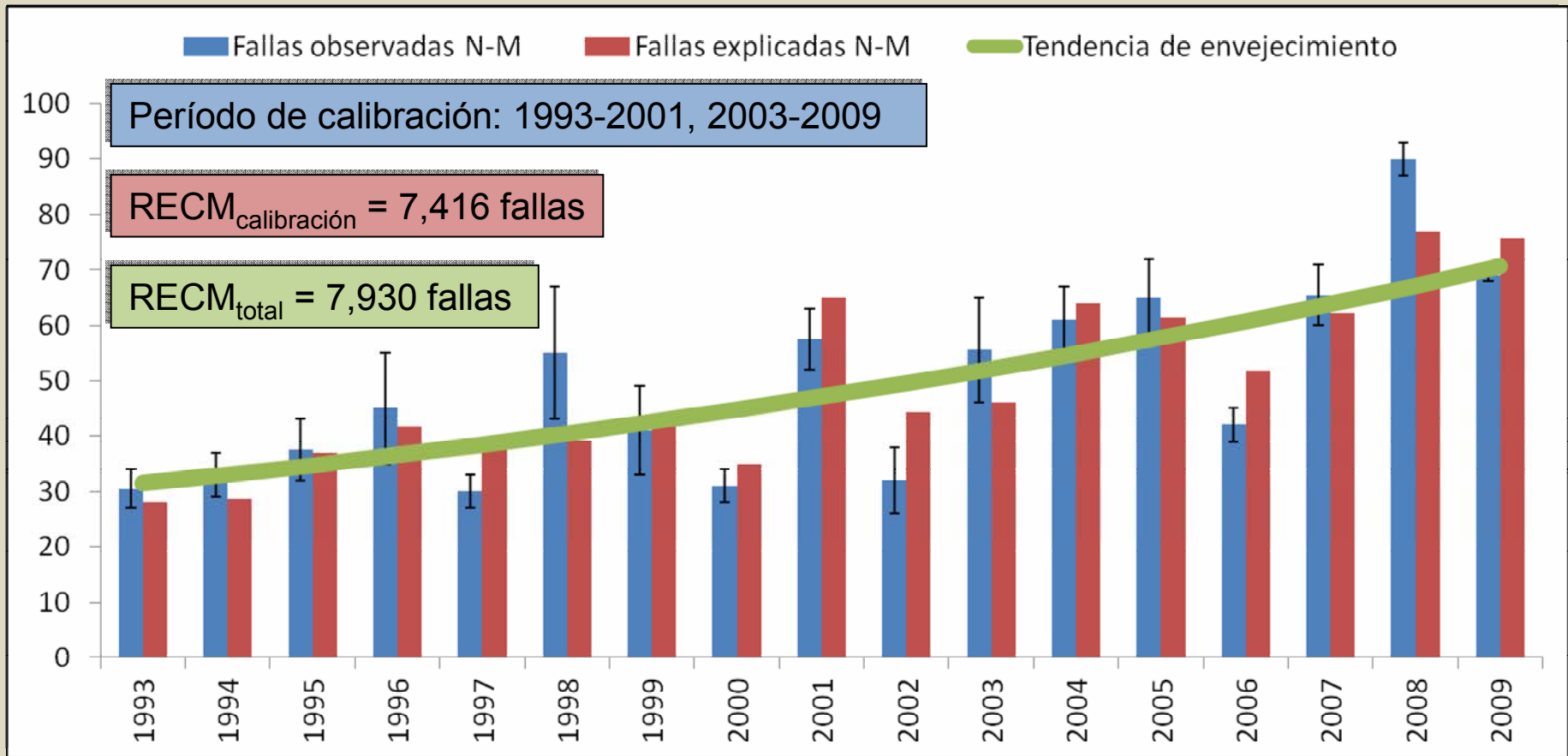
z → cantidad de días con precipitación media > 1 mm
durante el mismo período de invierno ($R^2 = 0,15$)



Aún si estos dos factores climáticos presentan una correlación ($R^2 = 0,18$), el modelo que incluye los dos factores es el mejor

Modelo de invierno

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



Modelo de invierno

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

PARÁMETROS DEL MODELO

$$c = 3,930$$

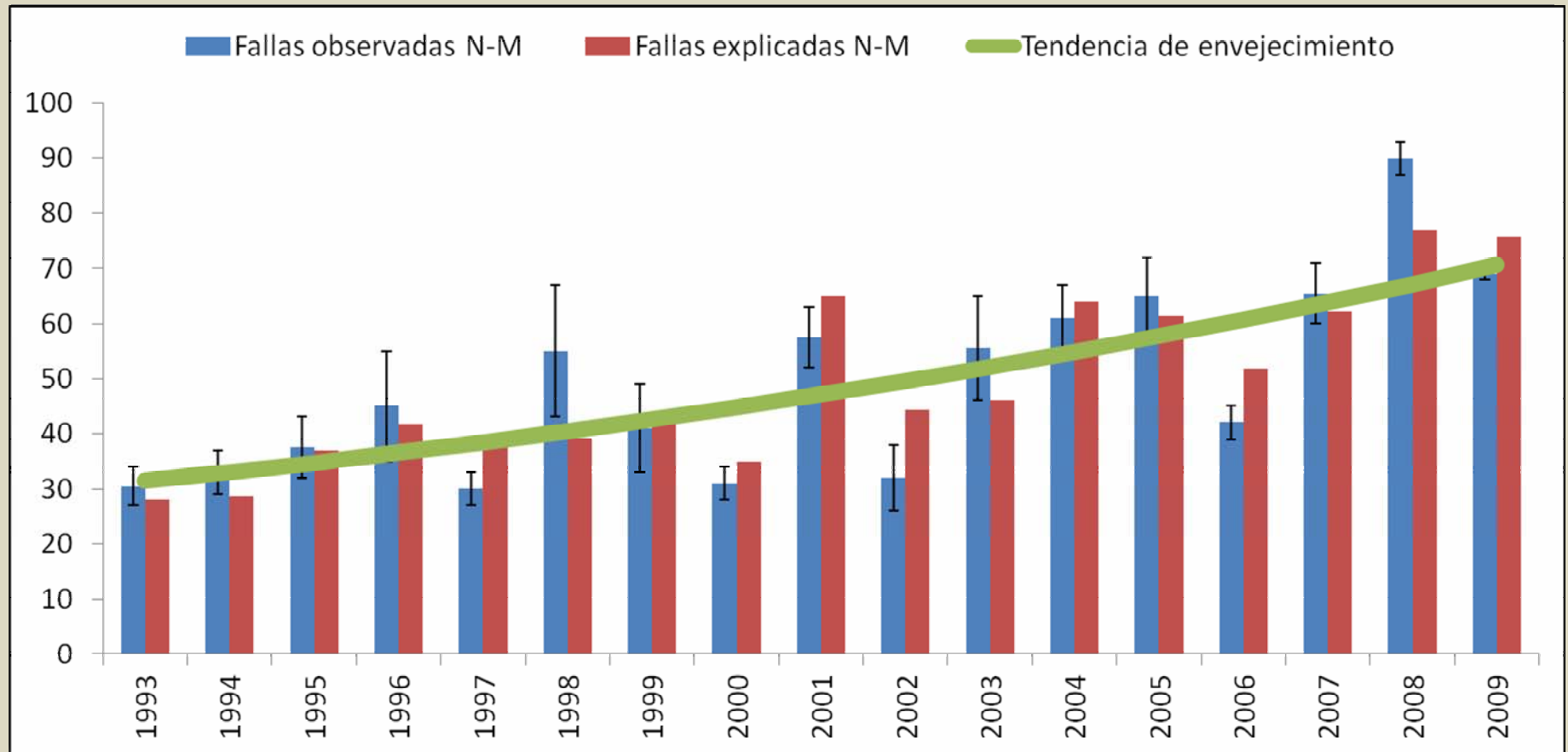
$$d = 0,00028435$$

$$f = -0,01421$$

$$q = 0,04935$$

Modelo de invierno

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



$$\exp(q) = \exp(0,04935) = 1,051$$



Crecimiento anual no lineal del 5,1 %

Modelo de invierno

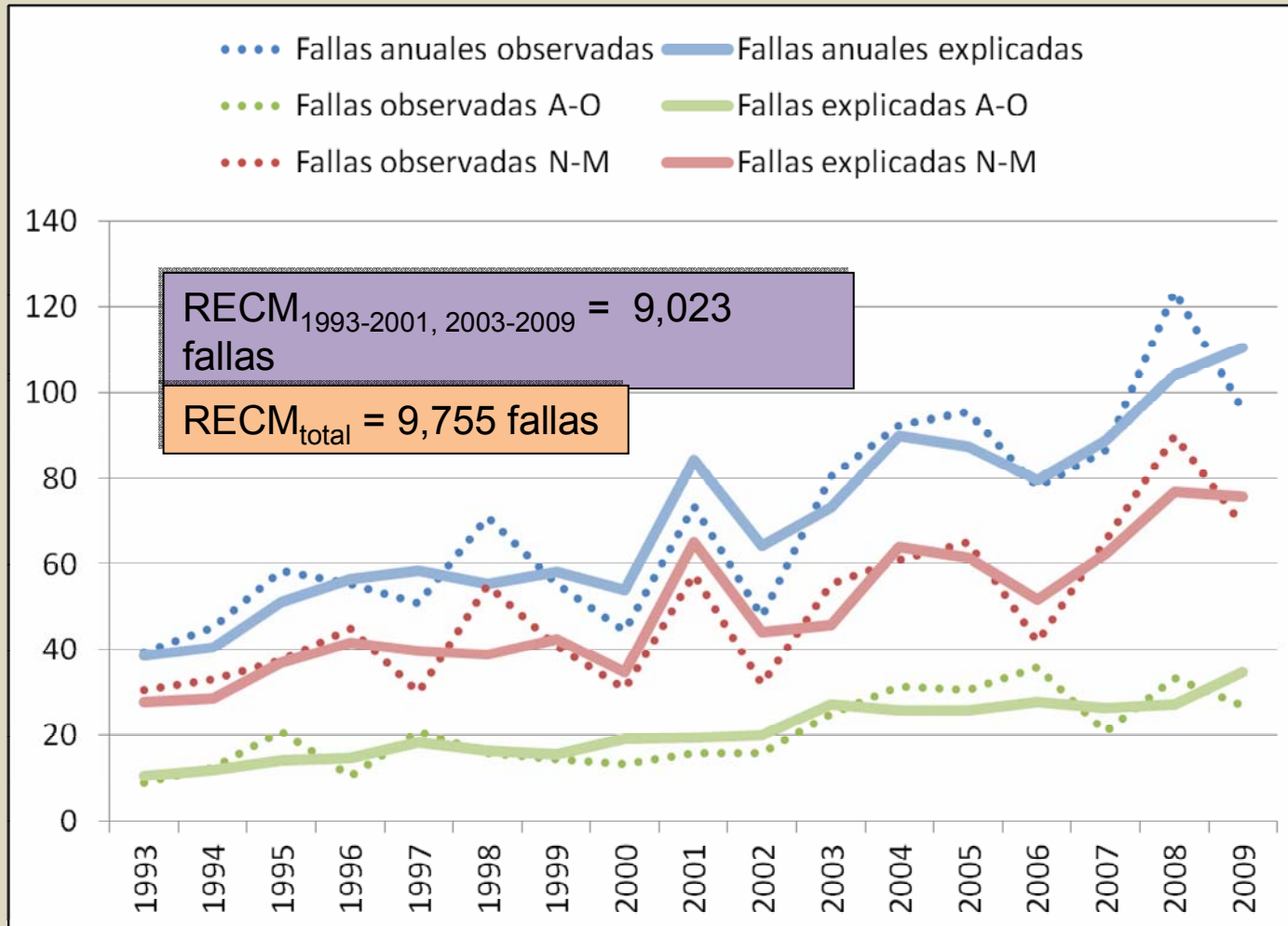
$$N_W = \exp(c + dy + fz + nq)$$

VARIACIONES DEL MODELO

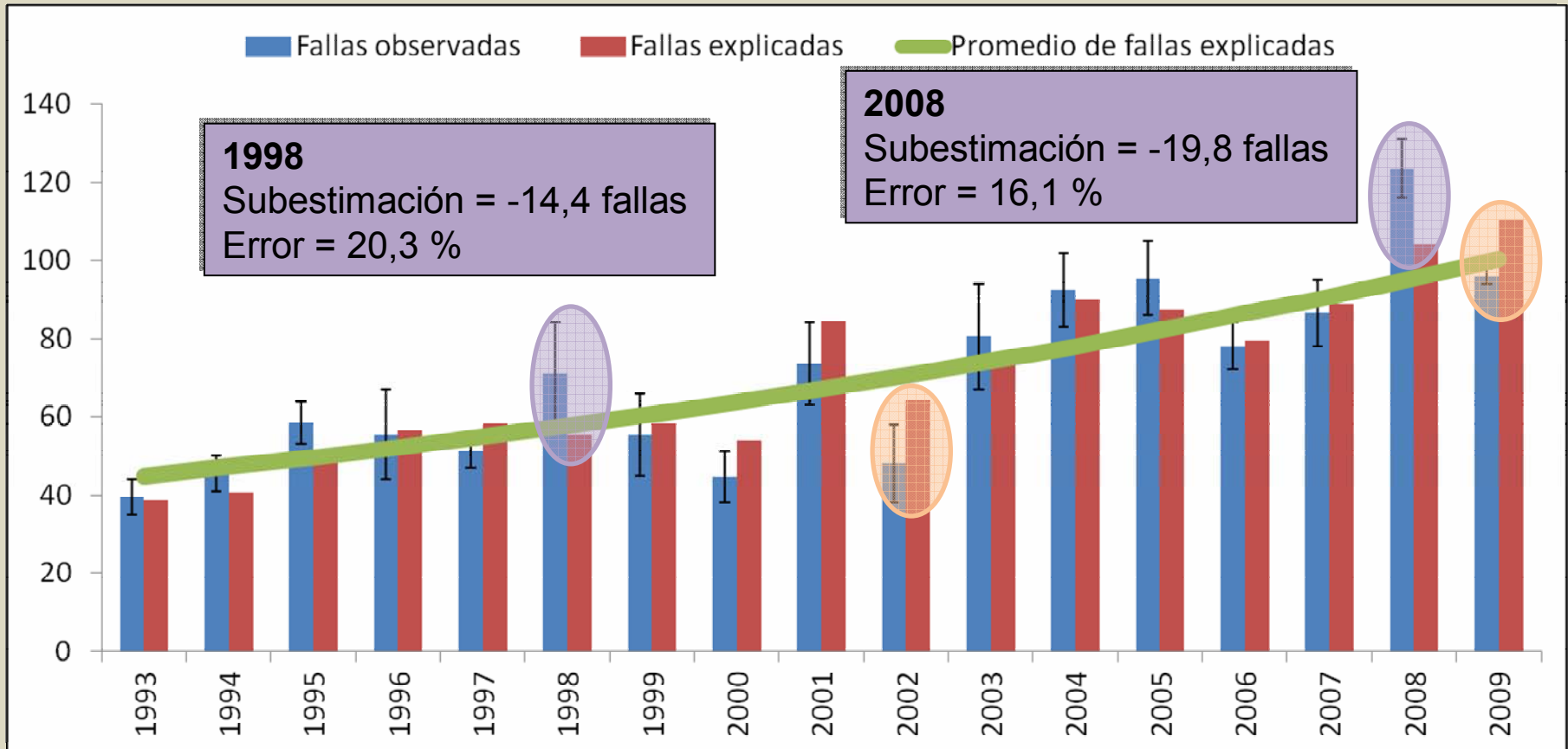
INVIERNO	RECM
Envejecimiento	10,6
Congelamiento (N-M)	12,9
Lluvia (N-M)	15,6
Envejecimiento y congelamiento (N-M)	9,6
Envejecimiento y lluvia (N-M)	8,1
Congelamiento (N-M) y lluvia (N-M)	12,5
Envejecimiento, congelamiento (N-M) y lluvia (N-M)	7,9
Envejecimiento y lluvia (S-M)	9,2
Envejecimiento, congelamiento (N-M) y lluvia (S-M)	8,9
Envejecimiento y lluvia (A-M)	10,2
Envejecimiento, congelamiento (N-M) y lluvia (A-M)	9,6

Suma de los dos modelos estacionales

$$N = N_{NW} + N_W$$



Suma de los dos modelos estacionales



1998
Subestimación = -14,4 fallas
Error = 20,3 %

2008
Subestimación = -19,8 fallas
Error = 16,1 %

2002
Sobreestimación = 17,8 fallas
Error = 37,0 %

2009
Sobreestimación = 15,3 fallas
Error = 15,9 %

Suma de los dos modelos estacionales

AÑO	SOBREESTIMACIÓN	ERROR	AÑO	SOBREESTIMACIÓN	ERROR
1993	0,4	1,0%	2002	17,8	37,0%
1994	-3,6	7,9%	2003	-5,8	7,2%
1995	-6,6	11,2%	2004	-2,5	2,7%
1996	1,4	2,6%	2005	-7,1	7,4%
1997	8,1	15,9%	2006	3,1	4,0%
1998	-14,4	20,3%	2007	3,5	4,0%
1999	3,7	6,7%	2008	-19,8	16,1%
2000	11,0	24,8%	2009	15,3	15,9%
2001	9,8	13,3%			

Actualización de los datos de falla

Modelo de no invierno

Modelo de invierno



Una sola tendencia de envejecimiento, no lineal, del 5,1 %/año

NOVIEMBRE A MARZO	FALLAS ACTUALIZADAS		DATOS BRUTOS	
	ρ	R^2	ρ	R^2
Duración de congelamiento	0,49	0,244	0,69	0,48
Período de fuerte calor				
Insolación	0,02	0,000	0,27	0,08
Precipitación total	-0,34	0,117	-0,34	0,11
Precipitación media	-0,42	0,177	-0,17	0,03
Días con precipitación media > 1 mm	-0,57	0,327	-0,38	0,15

Evaluación de los modelos

INSOLACIÓN	-17%	-13%	-8%	-4%	0%	4%	8%	13%	17%
$x_m^f \rightarrow$	$x_m^0 - 2 \sigma_x$	$x_m^0 - 1,5 \sigma_x$	$x_m^0 - \sigma_x$	$x_m^0 - 0,5 \sigma_x$	x_m^0	$x_m^0 + 0,5 \sigma_x$	$x_m^0 + \sigma_x$	$x_m^0 + 1,5 \sigma_x$	$x_m^0 + 2 \sigma_x$
x_m^f/x_m^0	0,83	0,87	0,92	0,96	1,00	1,04	1,08	1,13	1,17
N_{NWm}^f/N_{NWm}^0	0,79	0,84	0,89	0,94	1,00	1,05	1,12	1,18	1,25

CONGELAMIENTO	-75%	-56%	-38%	-19%	0%	19%	38%	56%	75%
$y_m^f \rightarrow$	$y_m^0 - 2 \sigma_y$	$y_m^0 - 1,5 \sigma_y$	$y_m^0 - \sigma_y$	$y_m^0 - 0,5 \sigma_y$	y_m^0	$y_m^0 + 0,5 \sigma_y$	$y_m^0 + \sigma_y$	$y_m^0 + 1,5 \sigma_y$	$y_m^0 + 2 \sigma_y$
y_m^f/y_m^0	0,25	0,44	0,62	0,81	1,00	1,19	1,38	1,56	1,75
N_{Wm}^f/N_{Wm}^0	0,90	0,92	0,95	0,97	1,00	1,03	1,05	1,08	1,11

PRECIPITACIÓN	-33%	-25%	-17%	-8%	0%	8%	17%	25%	33%
$z_m^f \rightarrow$	$z_m^0 - 2 \sigma_z$	$z_m^0 - 1,5 \sigma_z$	$z_m^0 - \sigma_z$	$z_m^0 - 0,5 \sigma_z$	z_m^0	$z_m^0 + 0,5 \sigma_z$	$z_m^0 + \sigma_z$	$z_m^0 + 1,5 \sigma_z$	$z_m^0 + 2 \sigma_z$
z_m^f/z_m^0	0,67	0,75	0,83	0,92	1,00	1,08	1,17	1,25	1,33
N_{wm}^f/N_{wm}^0	1,25	1,18	1,12	1,06	1,00	0,95	0,89	0,84	0,80

Escenarios de evolución

ESCENARIO	S1	S2	S3	S4	S5
Insolación	0%	4%	8%	13%	17%
Congelamiento	0%	19%	38%	56%	75%
Precipitación	0%	-8%	-17%	-25%	-33%
N_m^f/N_m^0	1,00	1,08	1,16	1,26	1,35

Conclusión y perspectivas

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 **duración de luz solar**, en horas

El **escenario** resultante de la combinación **más pesimista** de hipótesis propuesto en este estudio condujo a un **incremento del 35 % del número anual de fallas**

Conclusión y perspectivas

Los modelos desarrollados en este estudio son indudablemente más simples que los demás modelos desarrollados para el caso de Lyon

Esta simpleza es importante, ya que existe mucha incertidumbre en los datos de falla, aún a una escala anual

Considerar la importancia de prever fallas a ocurrir en los próximos años: las inversiones por parte de la gerencia de los servicios públicos urbanos serían destinadas eficientemente

Conclusión y perspectivas

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