

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE MODELOS PARA CUANTIFICAR Y MITIGAR EL RIESGO DE EVENTOS NATURALES EN LA RED VIAL NACIONAL

DESARROLLO, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN MODELO DE RIESGO DE AMENAZA VULCANOLÓGICA



Joaquín Dagá Kunze

Santiago, 28 de Marzo de 2017

I CONCURSO IDeA EN DOS ETAPAS
FONDEF - CONICYT

CONTENIDOS



1. Desarrollo del Modelo de Riesgo Vulcanológico
2. Validación del Modelo de Riesgo Vulcanológico
3. Aplicación del Modelo de Riesgo Vulcanológico



DESARROLLO MODELO DE RIESGO VULCANOLÓGICO



Conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo



Caracterización Amenaza

Infraestructura Crítica

Curvas de Fragilidad

Amenaza
Vulcanológica



Vulnerabilidad
Infraestructura
Vial



Riesgo Físico

Procesos volcánicos



Lahares

- Flujos compuestos por agua y sedimentos que se transportan por las laderas de un volcán.



Caída de Piroclastos

- Fragmentos sólidos de material volcánico que han sido expulsados al aire durante una erupción.



Flujos Piroclásticos

- Avalanchas incandescentes de gases y piroclastos.



Flujos de Lava

- Material magmático fundido expulsado por un volcán durante una erupción.

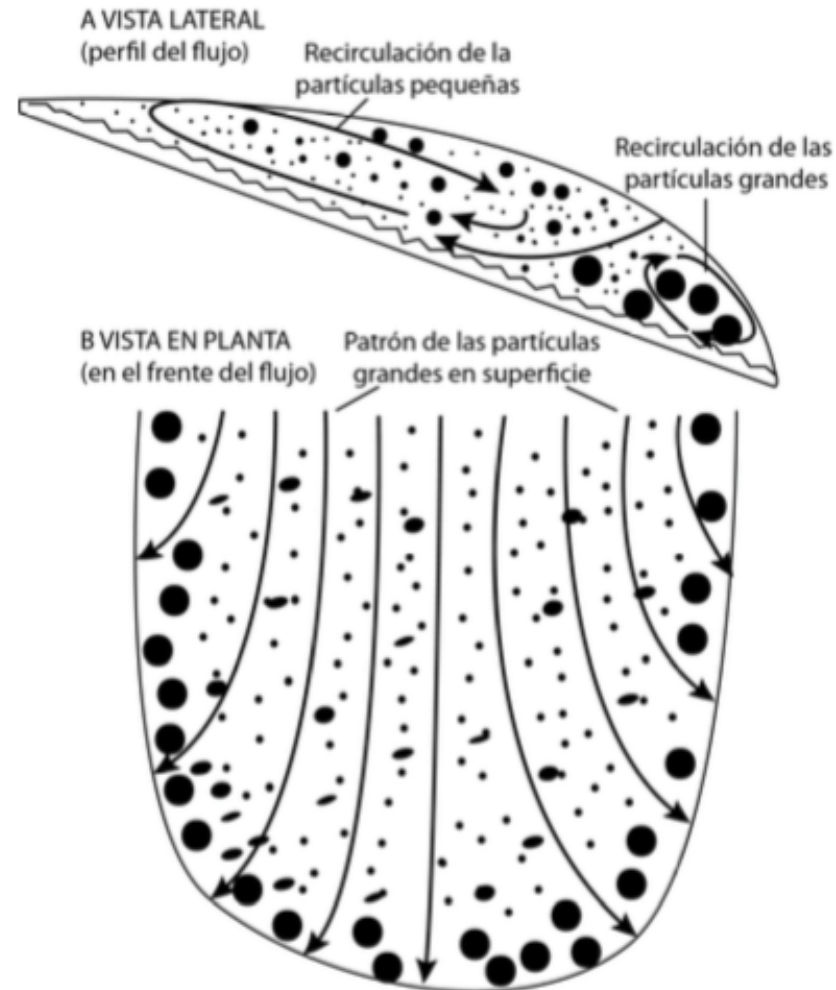
Ejemplos de efectos de lahares en infraestructura vial



Socavación generada por lahares



- Los procesos erosivos más importantes que ocurren en un **lahar es el socavamiento** de las pendientes pronunciadas y de las terrazas fluviales (Vallance, 2000; Smith y Lowe, 1991; Bono, 2014).
- La erosión genera hendiduras, además del arrastre de mega bloques (>10 m) y de árboles (Bono, 2014).
- La socavación ocurre alrededor de la infraestructura y es causada por la obstrucción del flujo, produciendo una aceleración del lahar.

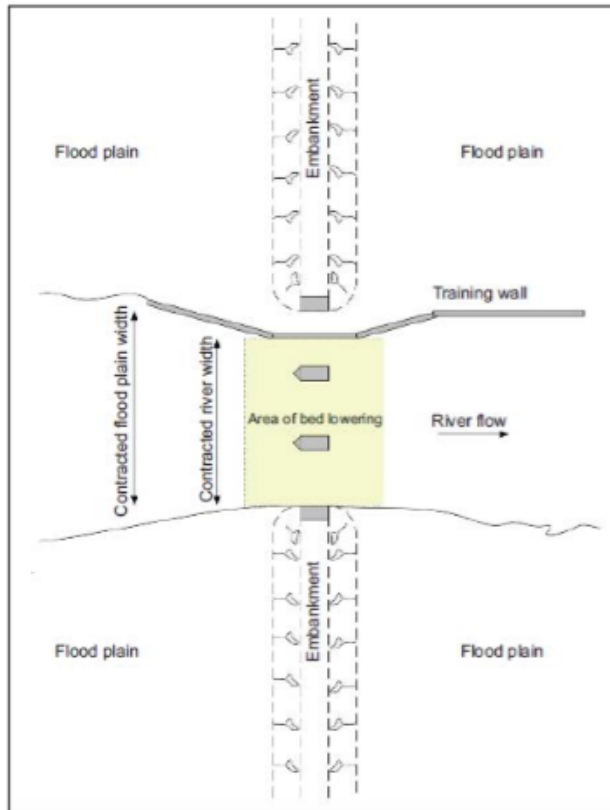


Fuente: Vallance, 2000.

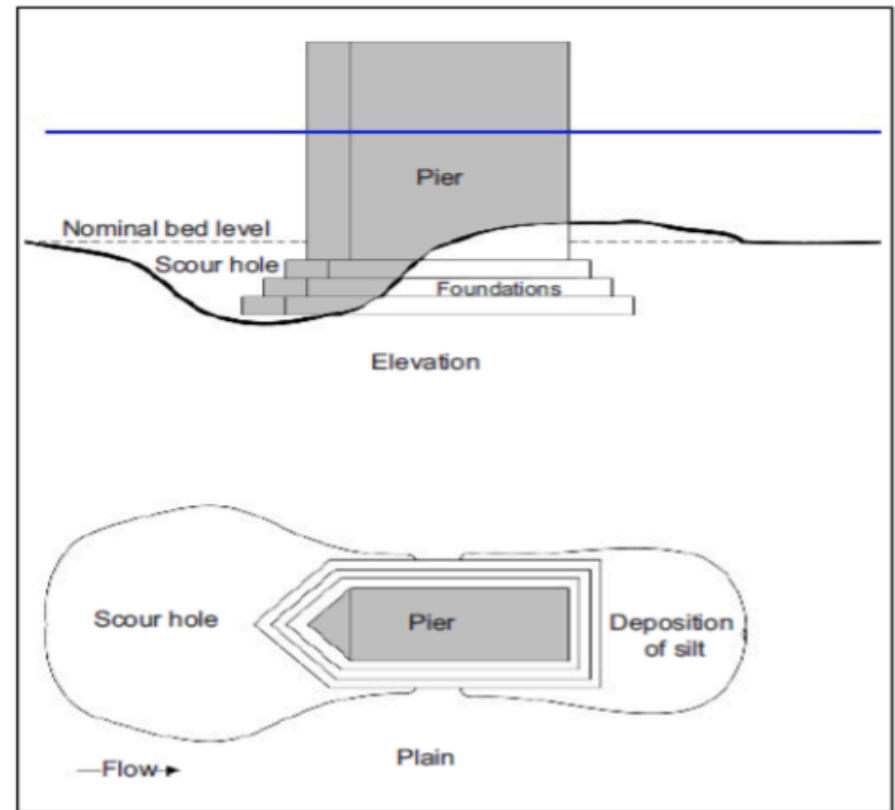
Tipos de socavación en puentes



Socavación por Contracción (Estribos)



Socavación Local (Estribos y Cepas)

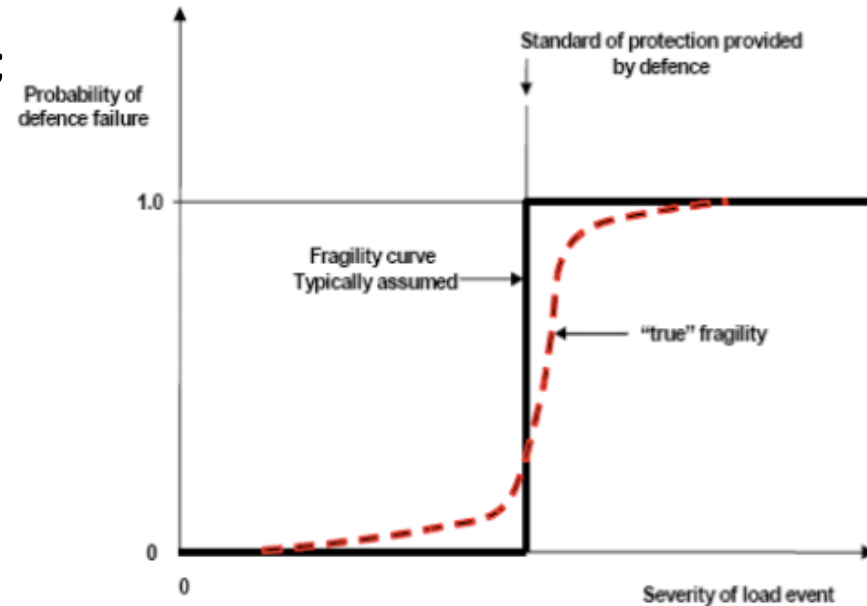


Fuente: Maddison, 2012.

Principios de Teoría de Confiabilidad (1/2)



- Tradicionalmente el diseño de puentes en cuanto a la socavación se basa en un análisis determinístico (Roca, 2012; Ter Huurne, 2014).
- Se elaboran escenarios determinísticos de evaluación (*what if*).
- Para el análisis de confiabilidad de estructuras se recomienda utilizar simulaciones de **Monte Carlo** (Roca, 2012; Wallingford, 2007; Pandey, 2007).



Fuente: Roca, 2012.

Principios de Teoría de Confiabilidad (2/2)



- Se definen funciones de demanda (solicitaciones) y oferta (capacidad).

$$D = f_D(v, h, b, W, H, etc) \quad \leftarrow \text{HEC-18}$$

$$O = f_O(v, h, b, Theta, Forma, etc) \quad \leftarrow \text{MC Vol-3}$$

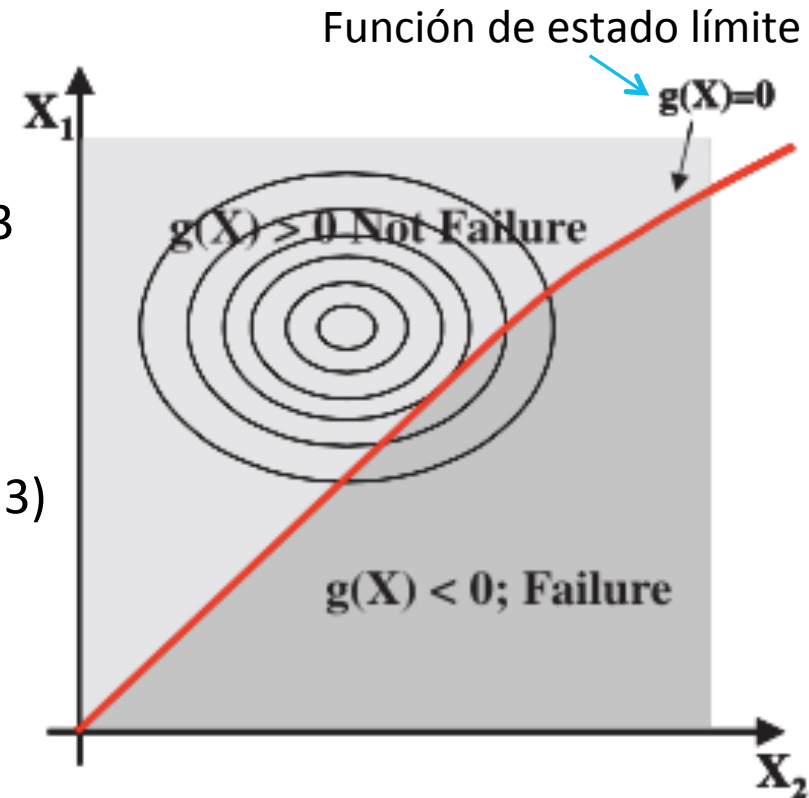
- La incertidumbre de algunas variables produce variación en las funciones.
e.g: Ancho Flujo/Largo Puente $\sim N(\mu=1,3; \sigma=0,3)$

- La función de margen de seguridad $g(X)$ está dada por la diferencia entre ambas funciones.

$$g(X) = f_O(X) - f_D(X)$$

- La probabilidad de falla corresponde a:

$$P_f = P(g(X) \leq 0)$$



Fuente: Echaveguren, 2005.

Mecanismos de falla de puentes ante lahares (1/2)



Puente Río
Blanco



Puente
Tronador



Mecanismos de falla de puentes ante lahares (2/2)



Puente
Zapatero



Puente El
Chingue



Diagrama de cuerpo libre puente y lahar

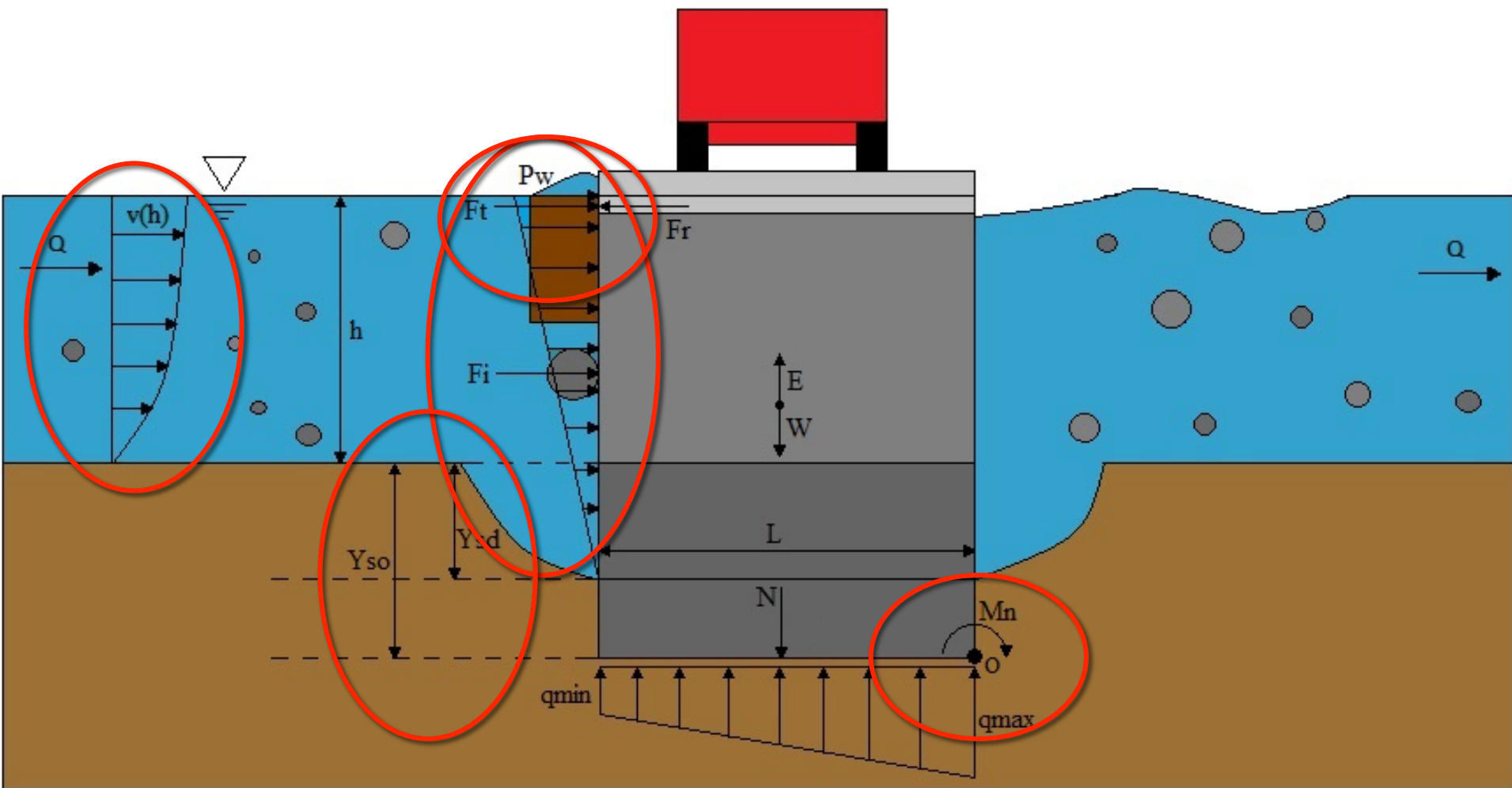
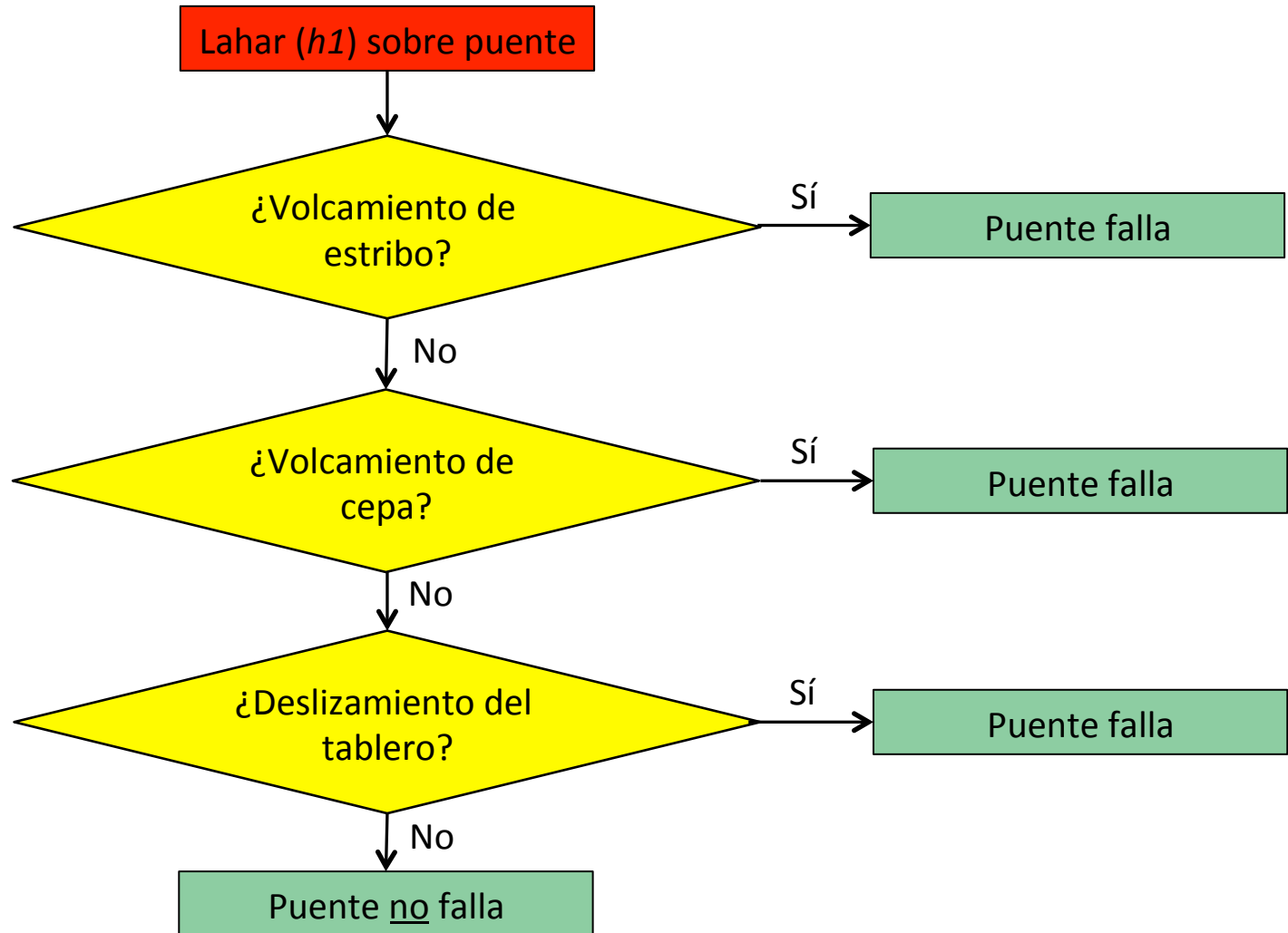


Diagrama de mecanismos de falla



Volcamiento de infraestructura



- El volcamiento de la infraestructura (VI) se produce cuando:
 - El momento volcante (M_v) es mayor al momento resistente (M_r).
 - La socavación demandada (Y_{sd}) es mayor a la de oferta (Y_{so}).

$$P_{VI} = P(g_{VI}(X) \leq 0)$$

$$g_{VI}(X) = \min \{M_r(X) - M_v(X); Y_{so}(X) - Y_{sd}(X)\}$$

- Las fuerzas que favorecen el volcamiento se asocian a:
 - Presión hidrodinámica del flujo lahárico.
 - Impacto de escombros transportados.

$$M_v = M_{flujo} + M_{impacto}$$

- El momento resistente se asocia directamente al peso del sistema:

$$M_r = N_{Infra} * \frac{L}{2} = m_{Infra} * g * \frac{L}{2}$$

$$N_{Infra} = W_{Infra} + W_{Super} - E$$

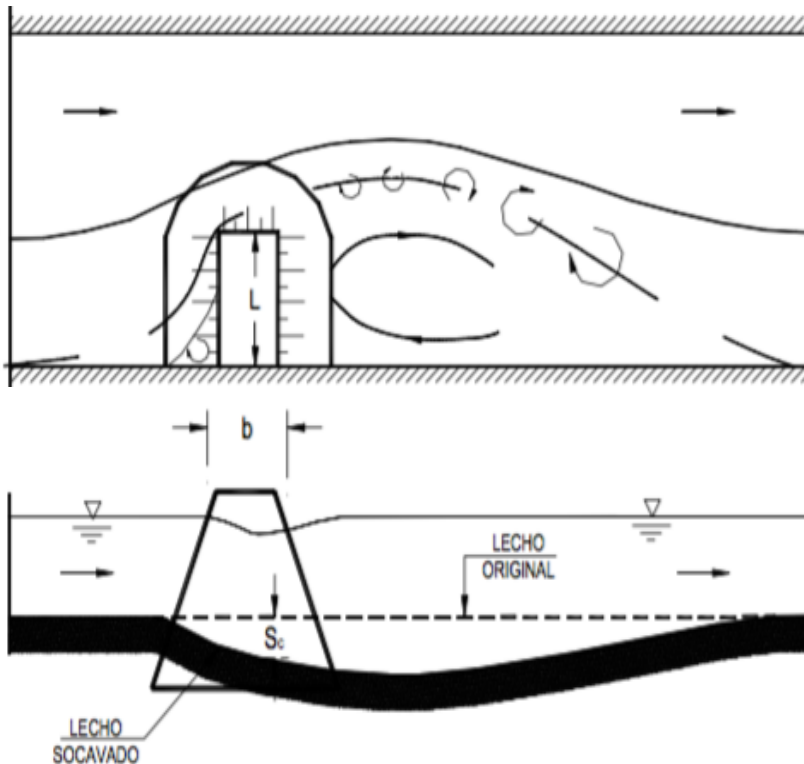
Oferta (MC V3) y demanda (HEC-18) en estribos



Manual de Carreteras (Melville)

$$Y_{e-o} = S_e + 2,0$$

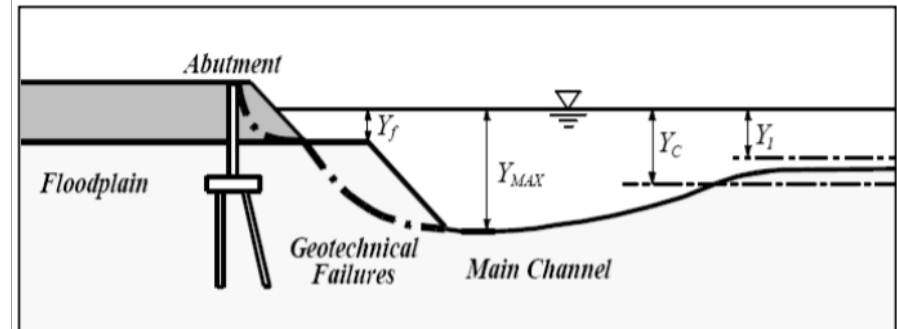
$$S_e = h_{diseño} * K_{\phi} * K_F * K_h * K_{\sigma} * K_I$$



HEC-18 (FHWA)

$$y_{max} = \alpha * y_0 * \left(\frac{q_{2c}}{q_1} \right)^{\frac{6}{7}} = \alpha * y_0 * \left(\frac{b_{Flujo}}{L_{Puenete}} \right)^{\frac{6}{7}}$$
$$Y_{e-d} = y_{max} - y_0$$

- y_{max} : Profundidad máxima con socavación corregida
- y_0 : Profundidad del flujo aguas arriba
- q_{2c} : Descarga unitaria del flujo contracción
- q_1 : Descarga unitaria del flujo aguas arriba
- Y_{e-d} : Profundidad de socavación de demanda



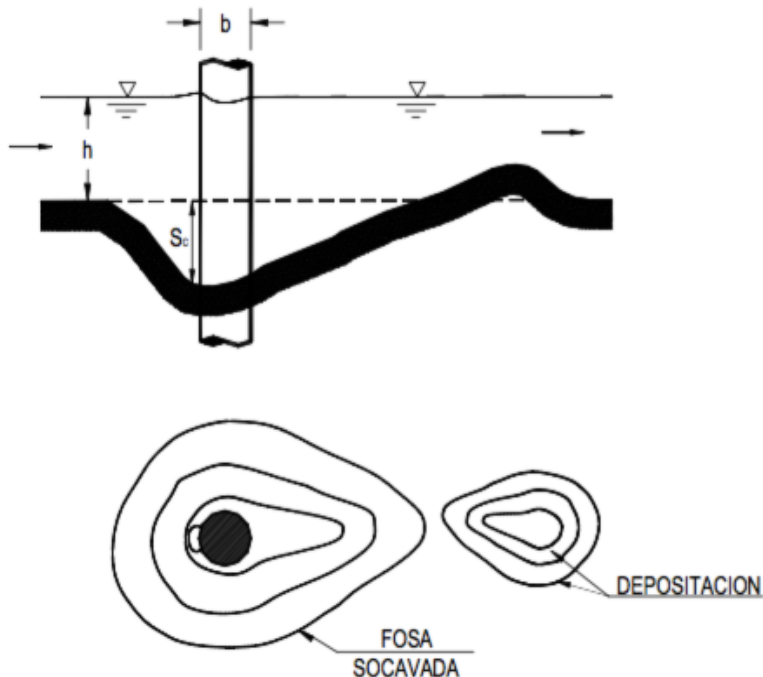
Oferta (MC V3) y demanda (HEC-18) en cepas

Manual de Carreteras (Breusers, Nicollet y Shen)

$$Y_{c-o} = S + 2,0 = K * S_c + 2,0$$

$$\frac{S_c}{b} = 2 * \tanh\left(\frac{h}{b}\right)$$

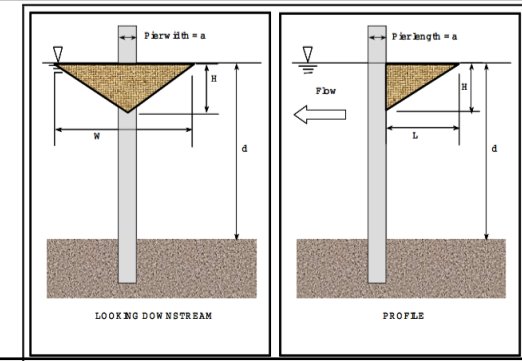
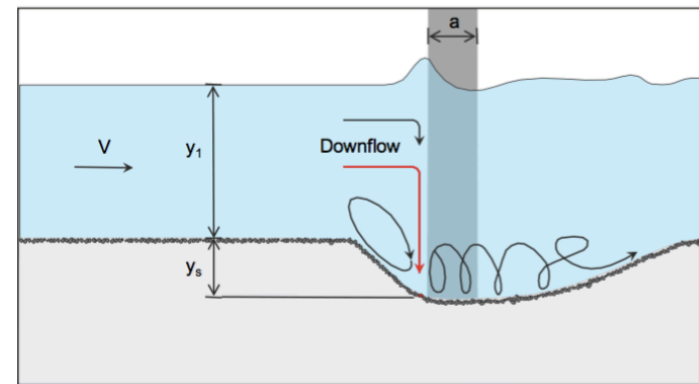
$$K = K_S * K_w * K_g * K_{gr} * K_R * K_d$$



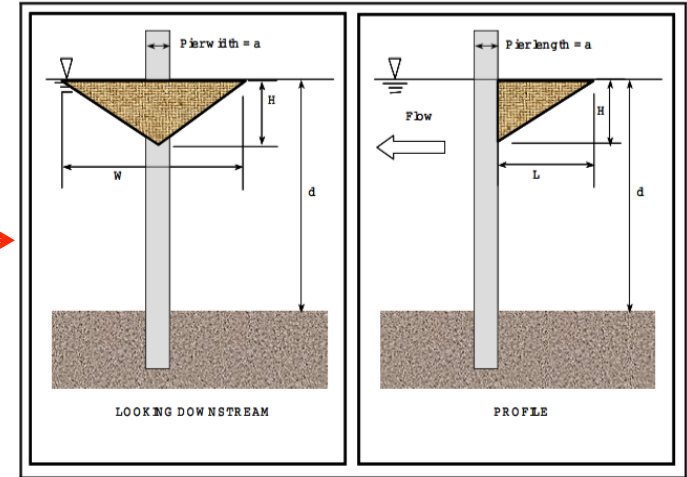
HEC-18 (FHWA)

$$Y_{c-d} = y_1 * 2 * K_1 * K_2 * K_3 * \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0,65} * Fr_1^{0,65}$$

$$a_d^* = \frac{K_E * (H * W) + (y_1 - K_E * H) * a}{y_1}$$



Acumulación de escombros lahares



- Zevenbergen (2007) analizó 736 registros fotográficos de lahares y flujos con escombros en puentes de USA.

Parámetro	W/a	L/a	L/W
Promedio	15,1	12,4	0,9
Rango	5,2-43	3-48	0,2-2,7
Desviación Estándar	8,2	9,2	0,5
-/+ Desviación Estándar	6,9-23,3	3,2-21,5	0,4-1,3

Fuente: Zevenbergen, 2007.

Presión hidrodinámica del flujo lahárico



- En la AASHTO (2012) se propone una ecuación para estimar la presión de un flujo sobre las cepas y estribos:

$$p_{w,Media} = C_D * \frac{\gamma}{2 * g} * v^2$$

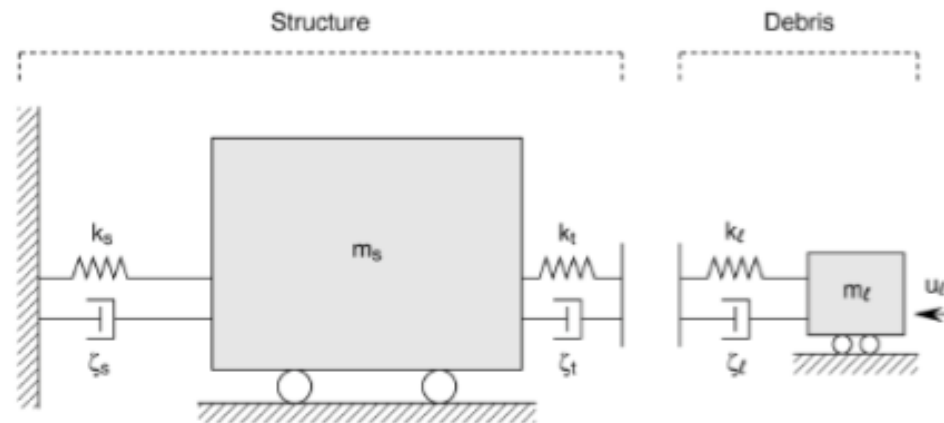
- C_D : Coeficiente de arrastre (adimensional)
- γ : Peso específico del fluido (kcf)
- g : Aceleración de gravedad (ft/s²)
- v : Velocidad del flujo (ft/s) ← Ecuación Manning

Tipo de Cepa	C_D
Extremo semi-circular	0,7
Extremo cuadrado	1,4
Cepa con escombros	1,4
Cepa con punta	0,8

- La presión se distribuye de manera triangular donde $P_{max}=2*P_{media}$ está en la superficie del flujo y $P=0$ está en el fondo del lecho.

Fuerza de impacto de escombros

- La fuerza de impacto de escombros puede ser modelado como un sistema de un grado de libertad asumiendo una estructura rígida (Haehnel *et al.*, 2004).



$$(m_1 + C * m_f) * \ddot{x} + \hat{k} * x = 0 \quad \longrightarrow \quad F_{Imp,max} = v * \sqrt{\hat{k} * m}$$

- Haehnel (2004) estimó la rigidez efectiva de contacto de colisión (k) para impactos de madera. En la AASHTO (1998) se propone el valor de k para colisión de buques rígidos.

$$F_{Imp\ Madera} = 1.550 * v * \sqrt{m}$$

$$F_{Imp\ Grava} = 3.742 * v * \sqrt{m}$$

Deslizamiento de tablero

- El deslizamiento del tablero (DT) se produce cuando:
 - La fuerza tangencial hidrodinámica (F_t) es mayor a la fuerza de roce (F_r) .

$$P_{DT} = P(g_{DT}(X) \leq 0)$$

$$g_{DT}(X) = F_r(X) - F_t(X)$$

- La fuerza resultante de la presión hidrodinámica sobre el tablero favorece su deslizamiento.

$$F_t = \begin{cases} 0 & \text{si } h < h_{Infra} \\ \int_0^{L_T} \int_{h_{Infra}}^h p_w(y) dy dx & \text{si } h_{Infra} < h < h_{Infra} + h_{Tablero} \\ \int_0^{L_T} \int_{h_{Infra}}^{h_{Infra} + h_{Tablero}} p_w(y) dy dx & \text{si } h > h_{Infra} + h_{Tablero} \end{cases}$$

- Las imperfecciones de la superficie de contacto genera una fuerza de roce:

$$F_r = \mu_e * N_{Tablero}$$

$$N_{Tablero} = W_{Tablero} - E$$

Simulaciones de Monte Carlo y categorías



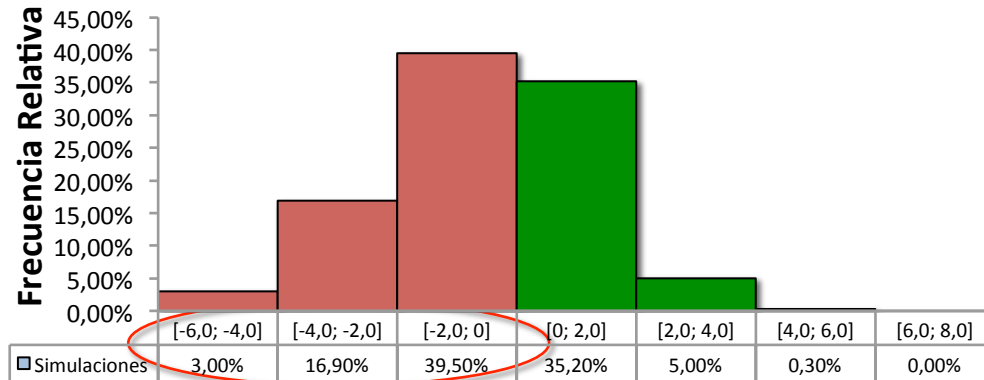
- Mediante 1.000 simulaciones de Monte Carlo para cada nivel de intensidad (h) se obtuvo la probabilidad de falla de **cada elemento** del puente.
- Se definieron dos categorías de puentes:
 - **C1**: Puentes sin cepas (75%)
 - **C2**: Puentes con cepas (25%)
- Se generaron curvas de fragilidad por elemento y por categoría de puente, considerando que la falla del puente se alcanza cuando falla uno o más de sus elementos.
- Se considera que los elementos trabajan de manera independiente.

Simulaciones de Monte Carlo y curvas de fragilidad

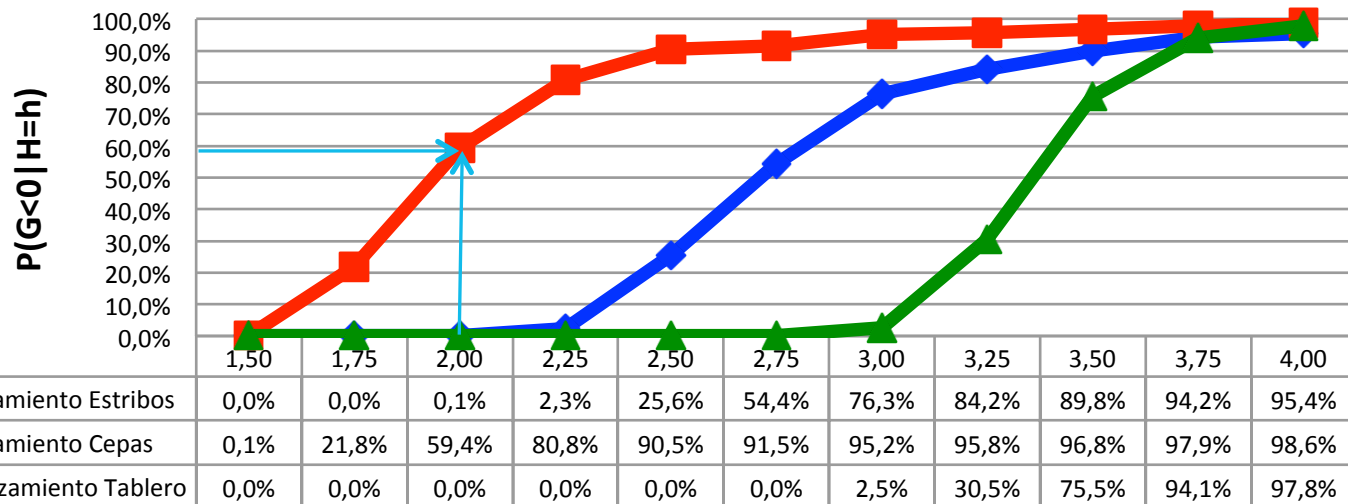


Nº	Intensidad	G_{VI} Estribos	G_{VI} Cepas	G_{DT} Tablero	Total Puento
1	2,0 m	0,34 MN-m	-0,78 MN-m	1,02 MN	-1
2	2,0 m	2,83 MN-m	3,02 MN-m	1,06 MN	1
3	2,0 m	1,92 MN-m	0,28 MN-m	0,12 MN	1
4	2,0 m	-0,13 MN-m	0,81 MN-m	-1,24 MN	-1
5	2,0 m	0,71 MN-m	-0,46 MN-m	0,87 MN	-1
...	...	...	...	...	...
N	2,0 m	-0,24 MN-m	-2,23 MN-m	0,83 MN	-1

Histograma $g_{VI}(X)$ cepas para $h = 2,0$ m



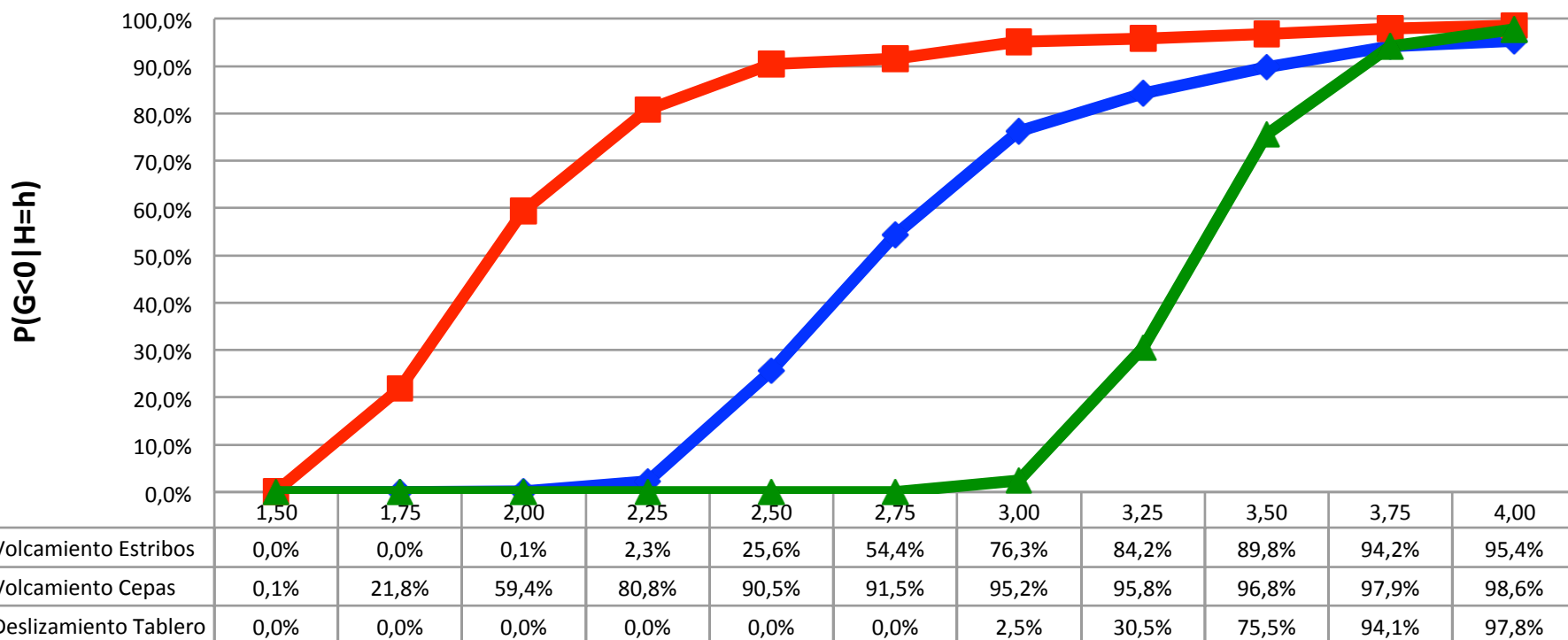
Curva de Fragilidad Elementos Puento



Curvas de fragilidad elementos



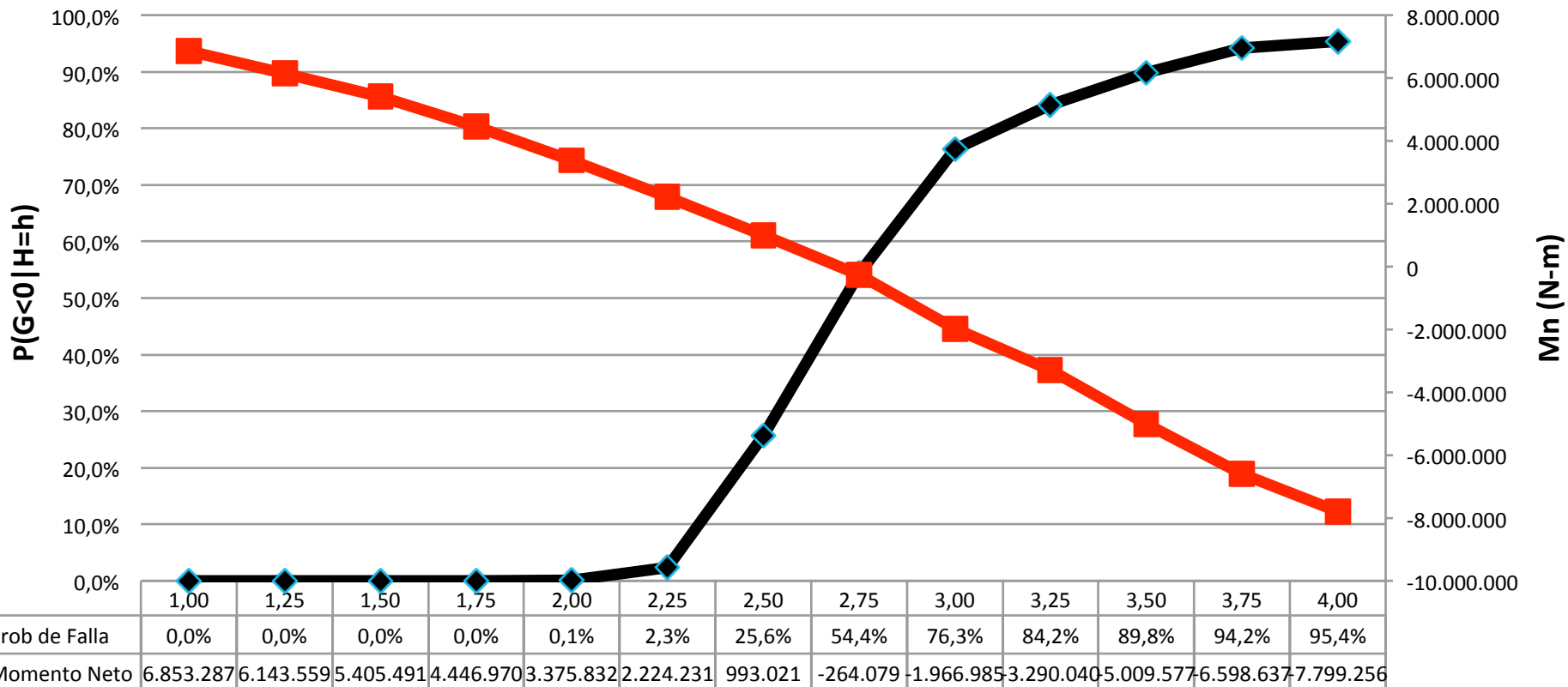
Curva de Fragilidad Elementos Puente



Curvas de fragilidad y momento neto estribos



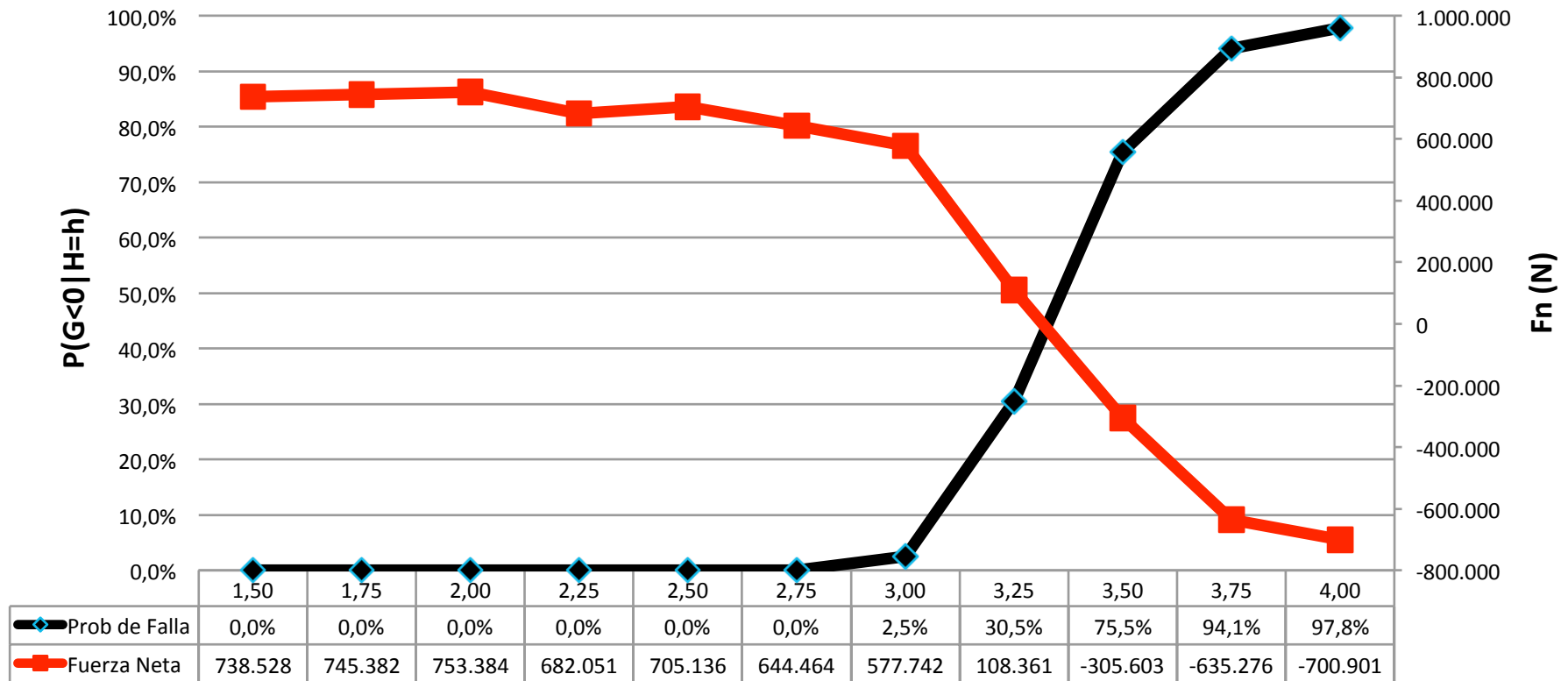
$P(G < 0 | H=h)$ y M_n Estribos



Curvas de fragilidad y fuerza neta tablero



Probabilidad de Falla y Fuerza Neta Tablero

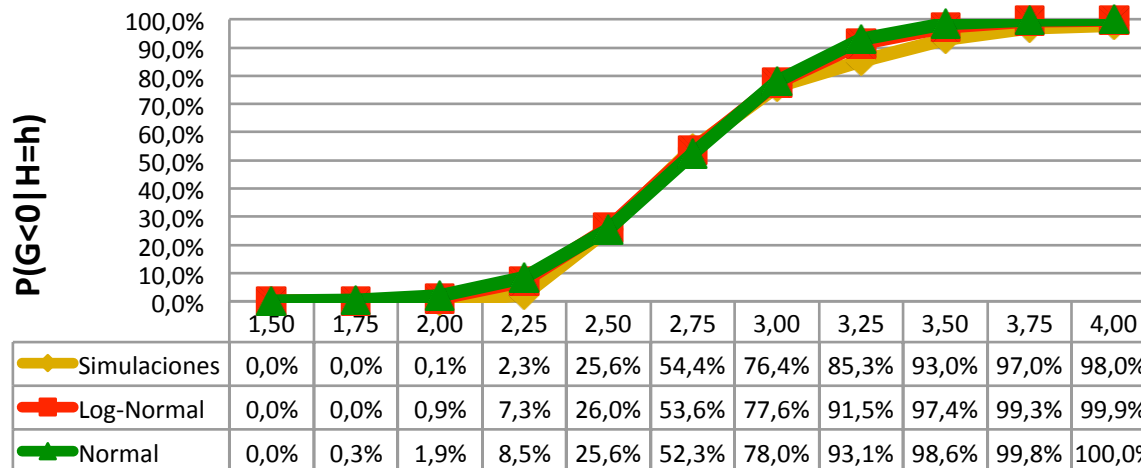


Parametrización de curvas de fragilidad

- El objetivo es parametrizar las curvas de acuerdo con una función de distribución de probabilidad.
 - e.g.: H falla **C1** $\sim$ Log-Normal ($\mu=1,00$; $\sigma=0,12$)
- Uso de **Máxima Verosimilitud (MV)** como método de parametrización para distribución Log-Normal.

$$\hat{\mu}, \hat{\beta} = \arg \max_{\mu, \beta} \sum_{i=1} \left[n_i \ln \left(\Phi \left(\frac{\ln(IM_i) - \mu}{\beta} \right) \right) + (N_i - n_i) \ln \left(1 - \Phi \left(\frac{\ln(IM_i) - \mu}{\beta} \right) \right) \right]$$

Simulaciones vs Teórica Puente sin Cepas (C1)

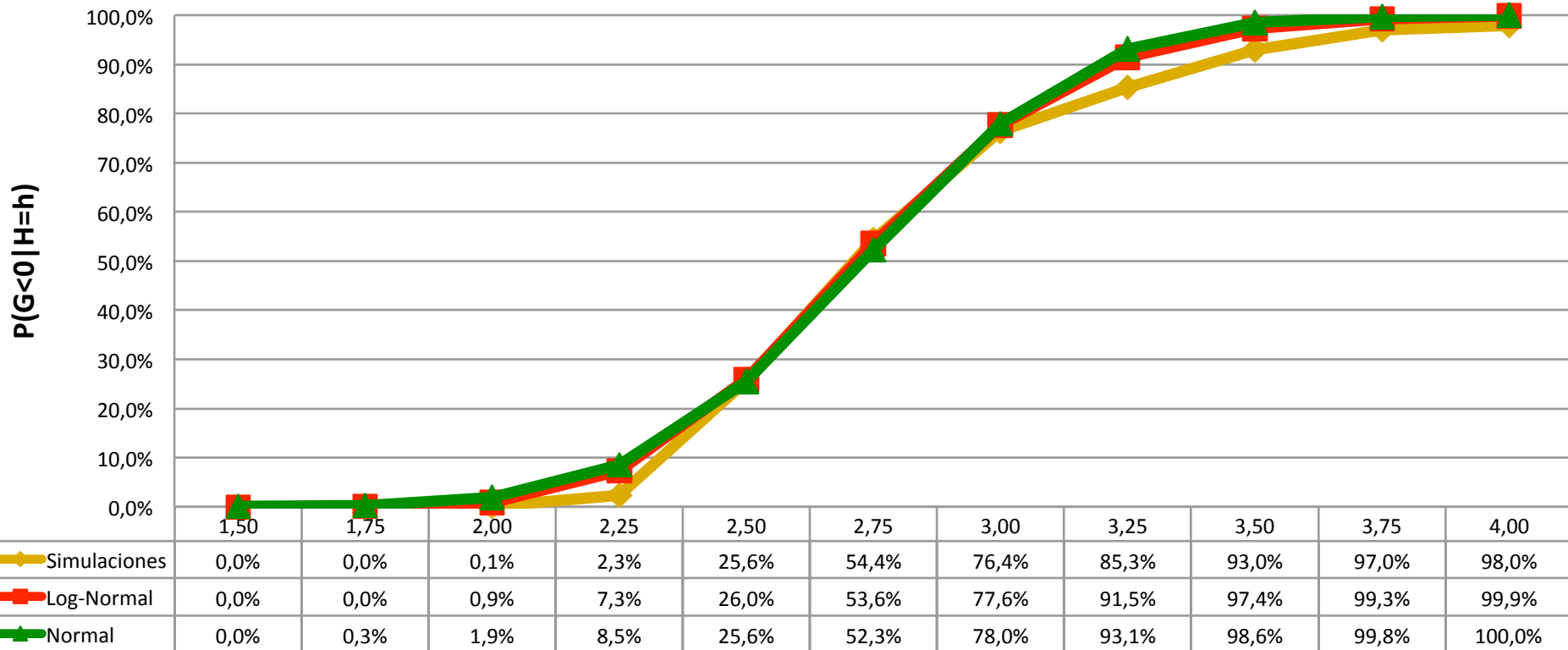


Curva de fragilidad puente categoría C1



- H falla **C1** $\sim$ Log-Normal ($\mu=1,00$; $\sigma=0,12$)
- H falla **C1** $\sim$ Normal ($\mu=2,73$; $\sigma=0,35$)

Simulaciones vs Teórica Puente sin Cepas

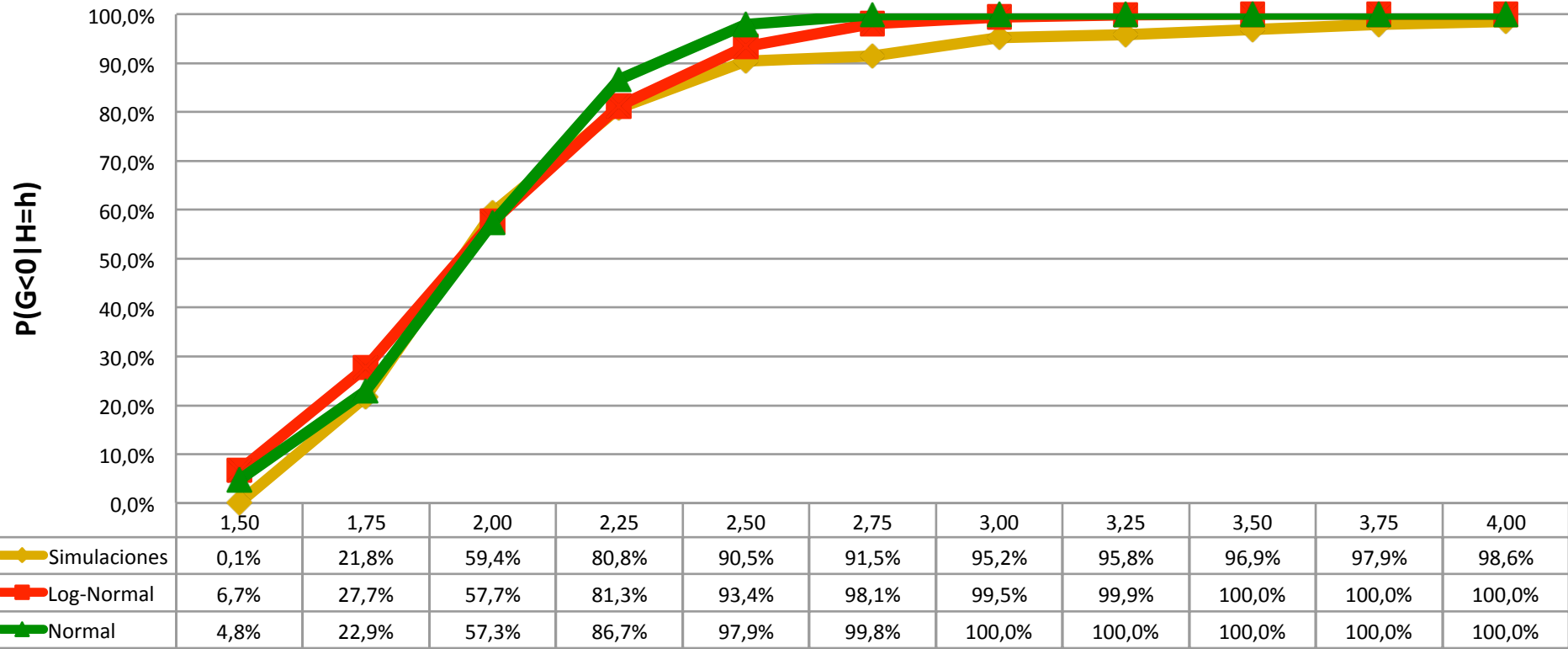


Curvas de fragilidad puente categoría C2



- H falla **C2** $\sim$ Log-Normal ($\mu=0,66$; $\sigma=0,17$)
- H falla **C2** $\sim$ Normal ($\mu=1,95$; $\sigma=0,27$)

Simulaciones vs Teórica Puente con Cepas



VALIDACIÓN MODELO DE RIESGO VULCANOLÓGICO



Conjuntos de información de lahares históricos

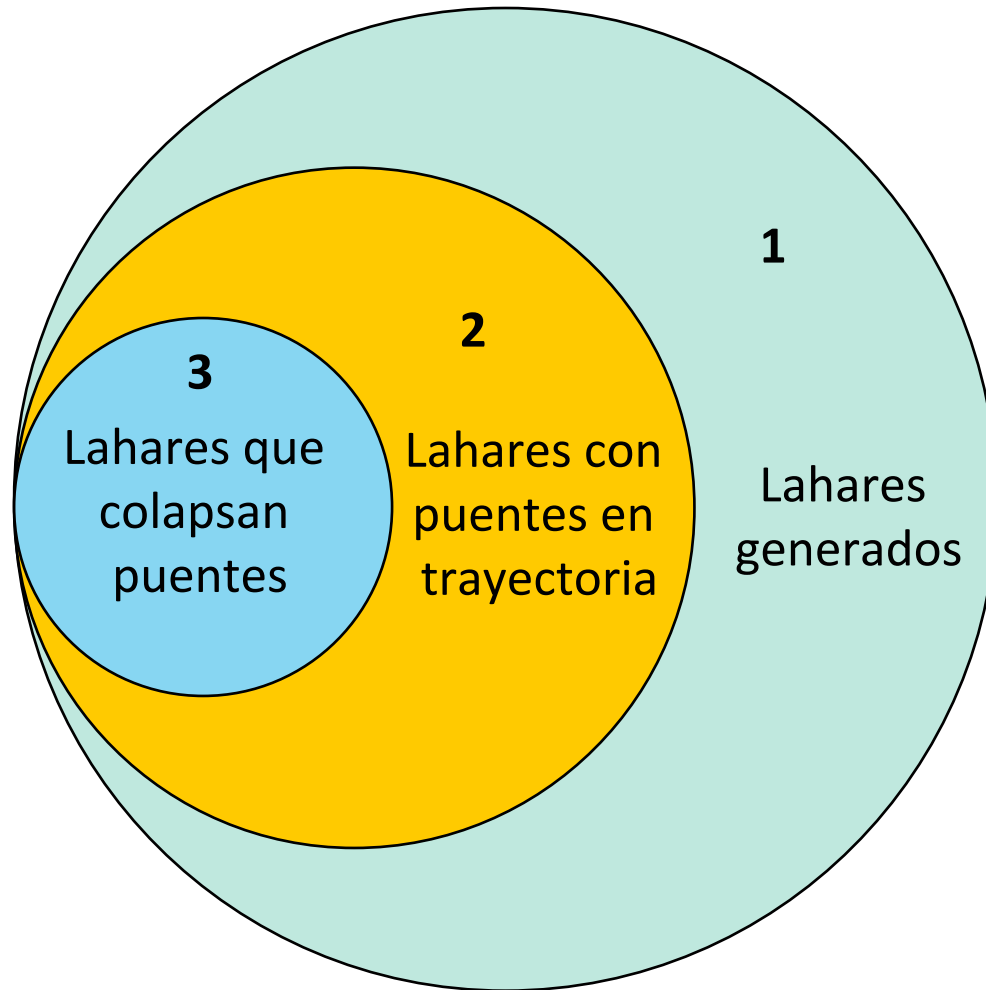
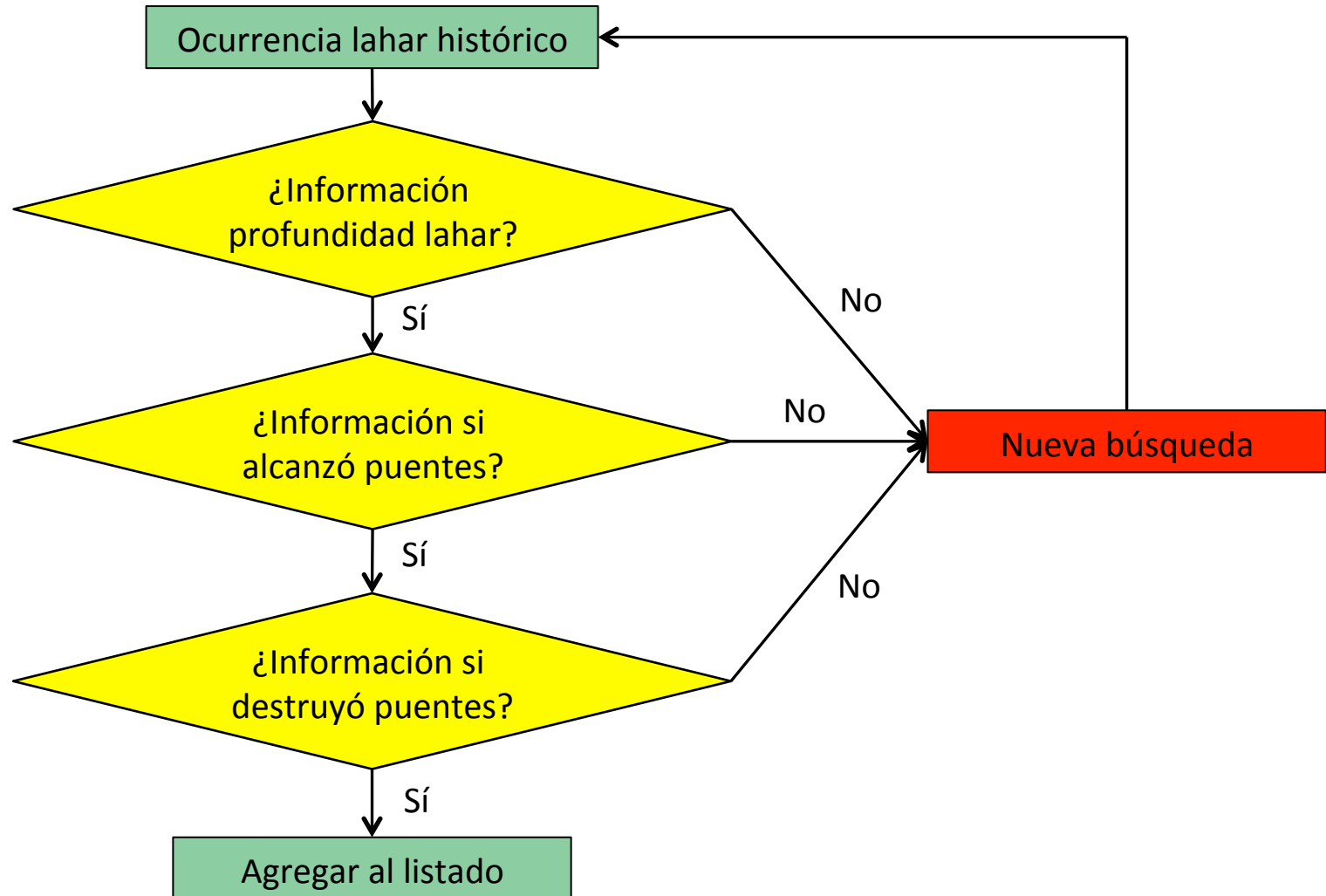


Diagrama de flujo de búsqueda de información





Lahares históricos Villarrica y Calbuco

Nº	Volcán	Año	Cauce/Zona	Distancia Volcán (km)	Gradiente Promedio (m/m)	Velocidad Máxima (m/s)	Profundidad Máxima (m)	Descarga (m3/s)	Fuente Medición	Fuente Bibliográfica
1	Villarrica	1964	Coñaripe	17,5	0,083	>10	5,0	2.000 a 2.400	Coñaripe	Naranjo y Moreno, 2004
2	Villarrica	1971	Puente Turbio	16	0,053	>10	4,0	5.000 a 10.000	Camino Pucón-Curarrehue	Naranjo y Moreno, 2004
3	Villarrica	1971	Correntoso	18	0,046	>10	6,7	10.000	Camino Pucón-Villarrica	Naranjo y Moreno, 2004
4	Villarrica	1971	Chaillupillén	12,5	0,100	>10	6,7	200	Pino Guacho	Naranjo y Moreno, 2004
5	Villarrica	1971	Chaillupillén	17,5	0,050	10 a 14	5,0	10.000 a 14.000	Lago Calafquén	Naranjo y Moreno, 2004
6	Villarrica	1971	Pedregoso	9	0,088	14	6,0	>7.000	Altitud 700 m	Naranjo y Moreno, 2004
7	Villarrica	1971	Pedregoso	12	0,088	>14	5,8	7.000 a 10.000	Altitud 440 m	Naranjo y Moreno, 2004
8	Villarrica	1971	Turbio-Río Pucón	18	0,053	5 a 10	5,5	12.000 a 20.000	Ríos Pucón y Turbio	Naranjo y Moreno, 2004
9	Villarrica	2015	Pedregoso	8	-	7	3,7	1.200	El Cerdúo	Flores, 2016
10	Villarrica	2015	Zanjón Seco	11,7	-	4	1,4	71	Candelaria	Flores, 2016
11	Calbuco	1961	Tepú	-	-	6	12,0	3.000	Tepú	Klohn, 1963
12	Calbuco	2015	Río Blanco	7,2	-	5	3,4	1.660	Puente Río Blanco	Flores, 2016
13	Calbuco	2015	Río Sur	10,7	-	-	2,5	-	Puente Zapatero	Registro Fotográfico

Efectos históricos de lahares en puentes chilenos



Nº	Volcán	Año	Cauce/Zona	Profundidad Máxima (m)	Fuente Medición	Puentes sin Cepa Alcanzados	Puentes sin Cepa Destruídos	Puentes con Cepa Alcanzados	Puentes con Cepa Destruídos
1	Villarrica	1971	Puente Turbio	4,0	Camino Pucón-Curarrehue	Turbio	Turbio	-	-
2	Villarrica	1971	Correntoso	6,7	Camino Pucón-Villarrica	-	-	Correntoso	Correntoso
3	Villarrica	1971	Chaillupillén	6,7	Pino Guacho	Madera S/N	Madera S/N	-	-
4	Villarrica	1971	Chaillupillén	5,0	Lago Calafquén	Challupén	Challupén	-	-
5	Villarrica	2015	Pedregoso	3,7	El Cerdúo	El Cerdúo	El Cerdúo	Madera S/N	Madera S/N
6	Villarrica	2015	Zanjón Seco	1,4	Candelaria	Carmelito, Zanjón Seco	-	Seco	-
7	Calbuco	1961	Tepú	12,0	Tepú	-	-	Tepú	Tepú
8	Calbuco	2015	Río Blanco	3,4	Puente Río Blanco	Tronador	Tronador	Río Blanco	Río Blanco
9	Calbuco	2015	Río Sur	2,5	Puente Zapatero	Zapatero, Pescado 2	Zapatero	-	-

Fuente: Castruccio, Clavero y Rivera, 2005; González, 1995, Naranjo y Moreno, 2004; Moreno, Naranjo y Clavero, 2006; Petit-Breuilh, 1999.

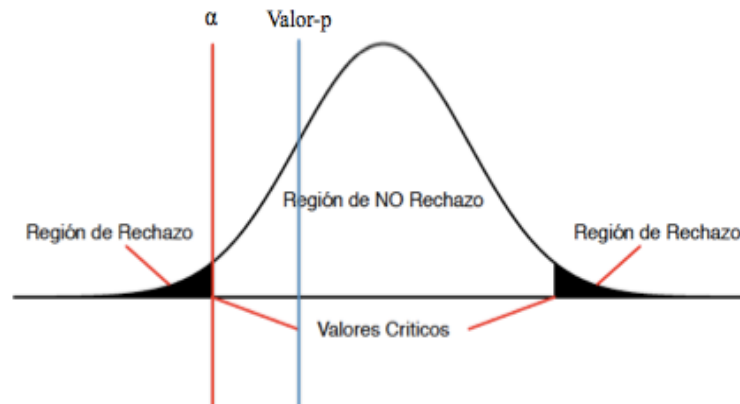
Test de hipótesis estadístico

- La hipótesis nula H_0 definida establece que la probabilidad de falla de puentes ante lahares es igual a la indicada por el modelo analítico.
- No es posible rechazar la hipótesis nula H_0 con un nivel de significancia de 20%.**

$$H_0: p = p_0 \quad vs \quad H_a: p \neq p_0$$

$$\hat{p} = \bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \sim \text{Normal} \left(p_0, \sqrt{\frac{p_0(1-p_0)}{n}} \right)$$

$$\text{valor} - p \geq 21,3\% \not\leq \alpha = 10\% \quad \alpha_{\text{crítico}} = \text{valor} - p = 21,3\%$$

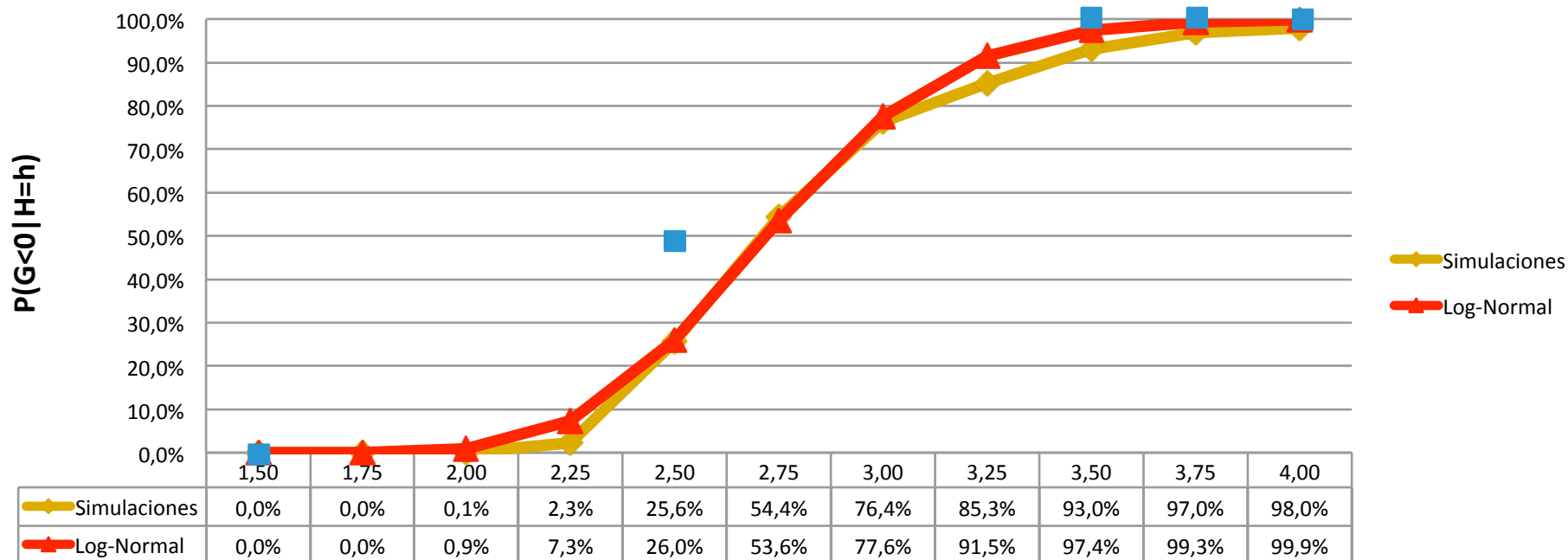


Analítica vs empírica puentes categoría C1



N°	H (m)	Puentes sin Cepas (C1)			
		Analítica	Empírica	Zn	valor-p
1	2,50	25,5%	50,0%	0,79	21,3%
2	3,50	93,0%	100,0%	0,27	39,2%
3	3,75	97,3%	100,0%	0,17	43,4%
4	4,00	97,2%	100,0%	0,17	43,3%
5	5,00	99,4%	100,0%	0,08	46,9%

Simulaciones vs Empírica Puente sin Cepas

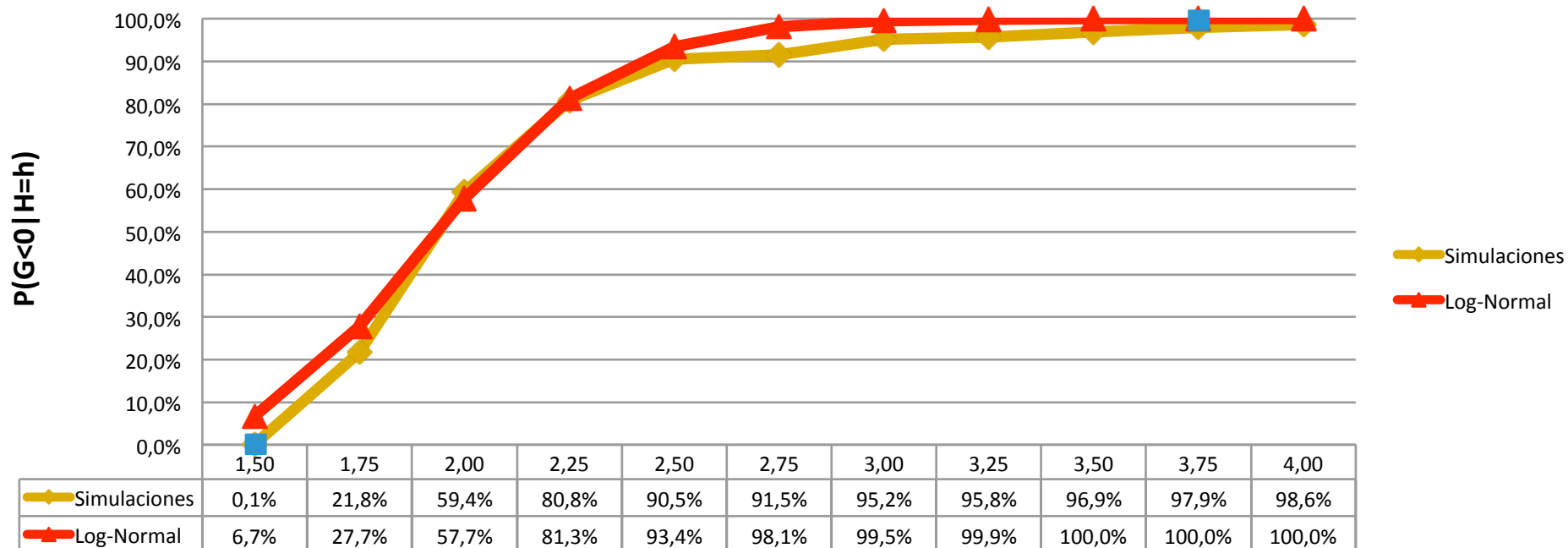


Analítica vs empírica puentes categoría C2



N°	H (m)	Puentes con Cepas (C2)			
		Analítica	Empírica	Zn	valor-p
1	2,00	97,2%	100,0%	0,17	43,3%
2	3,75	98,0%	100,0%	0,14	44,3%

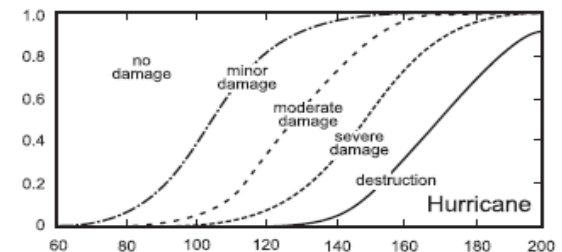
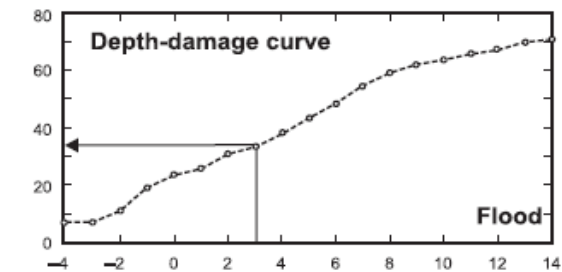
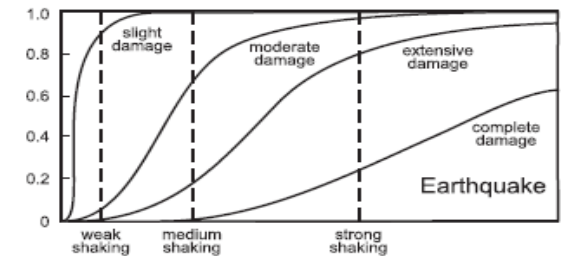
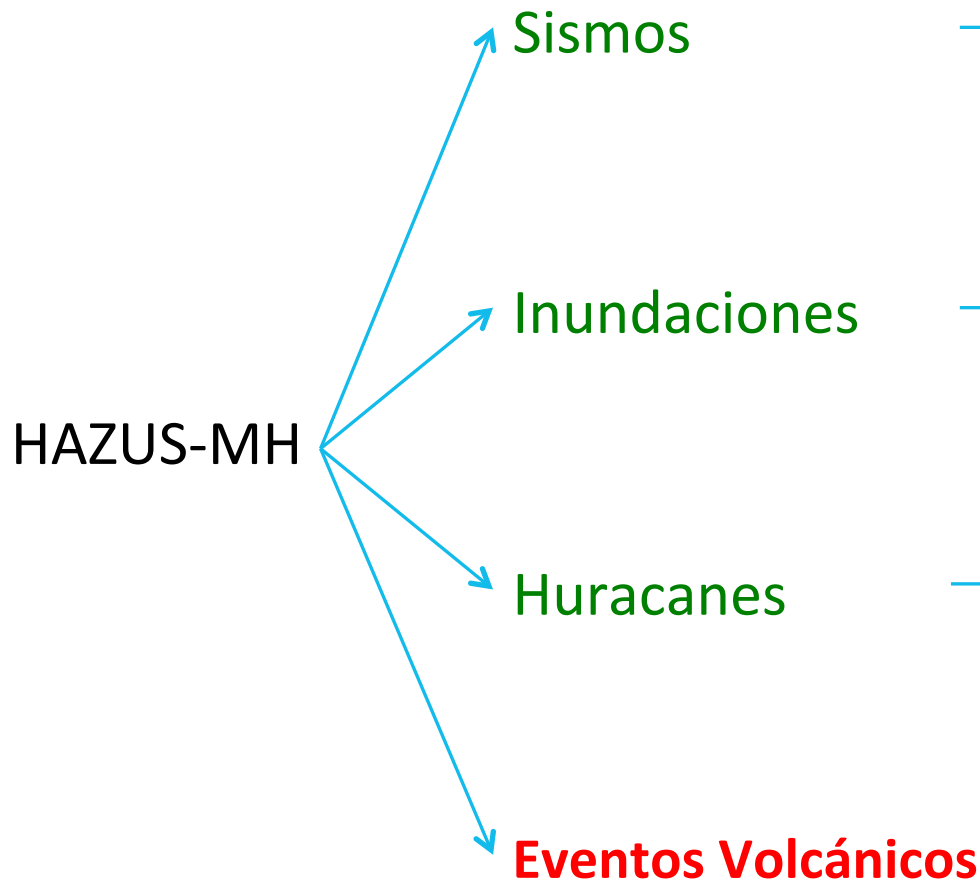
Simulaciones vs Empírica Puente con Cepas



APLICACIÓN MODELO DE RIESGO VULCANOLÓGICO



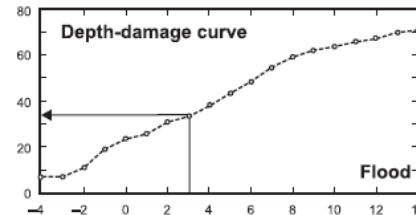
HAZUS-MH como herramienta de modelación



Marco conceptual herramienta de aplicación



Lahares



$$\text{(Amenaza)} \times \text{(Inventario)} \times \text{(Vulnerabilidad)} = \text{Riesgo}$$

Lahares (LAHARZ)

- Exposición
- Profundidad

Puentes

- Atributos físicos

Daño físico directo

- Estribos
- Cepas
- Tablero
- Total puente

Zonas de exposición de lahares

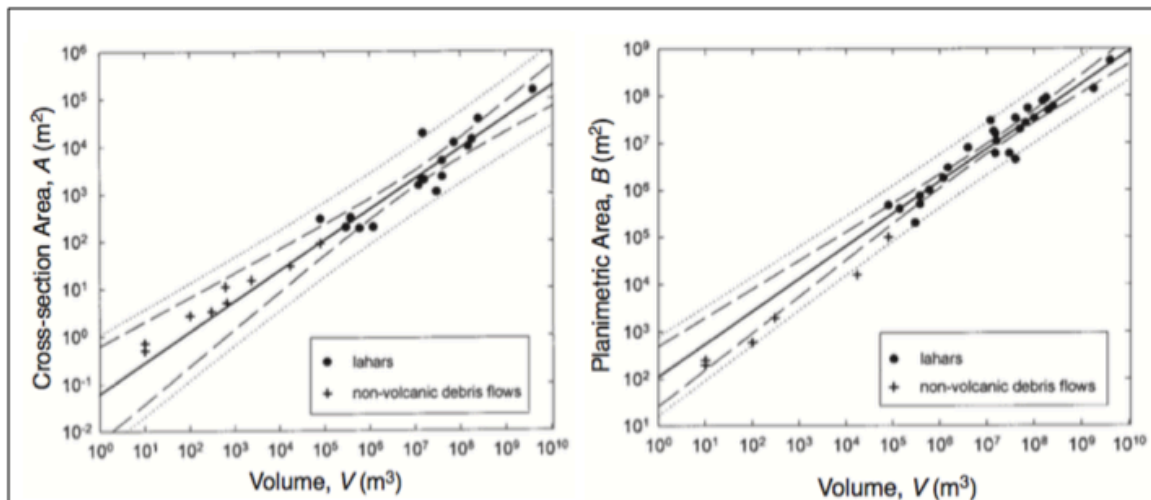
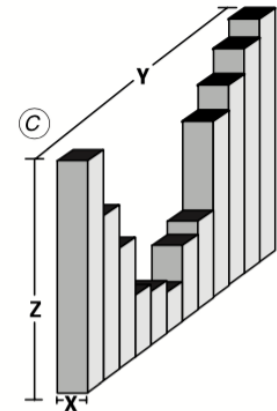
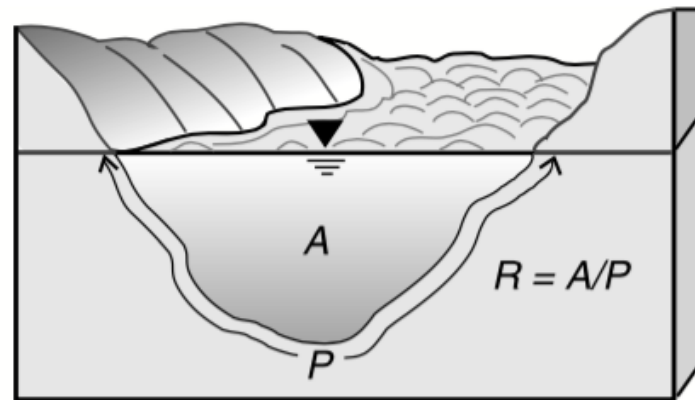
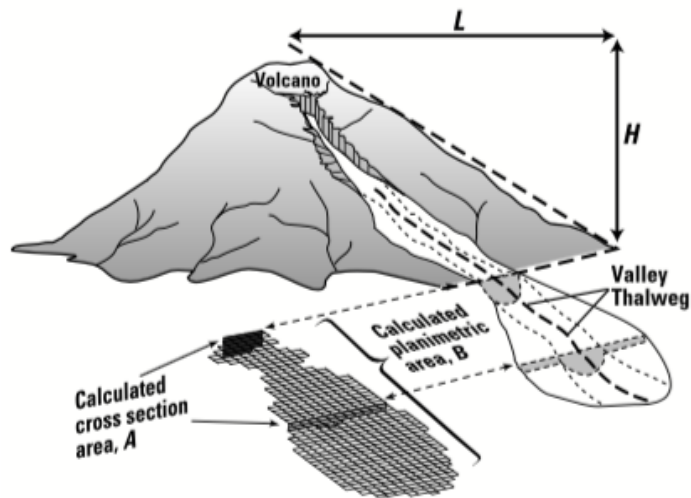


- El Servicio de Geología de Estados Unidos (USGS) desarrolló un método de delimitación de áreas expuestas a lahares (Iverson y Schilling, 1998).
- Utilizando un método semi-empírico, desarrollaron relaciones entre:
 - Volumen del lahar (V) y el área de la sección transversal del lahar (A).
 - Volumen del lahar (V) y el área planimétrica del lahar (B) en la zona distal del volcán.

$$A = 0,05 * V^{2/3}$$

$$B = 200 * V^{2/3}$$

Sección transversal y área planimétrica



Fuente: Iverson y Schilling, 1998.

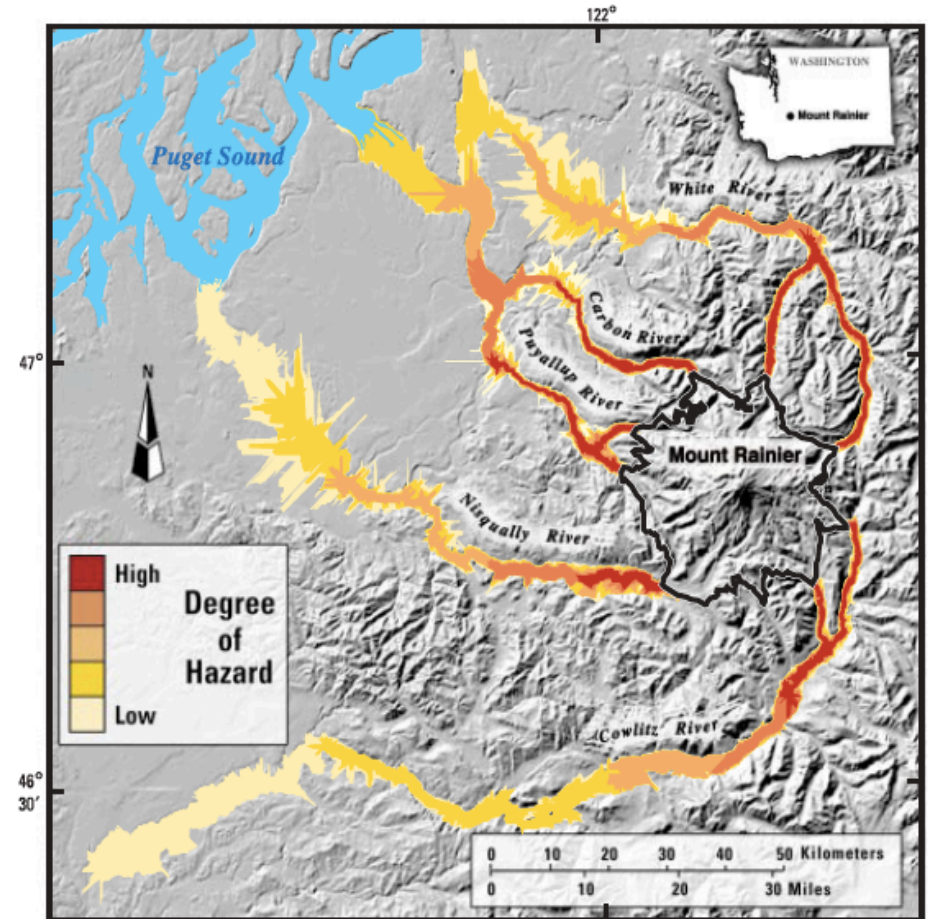
$$A = 0,05 * V^{2/3}$$

$$B = 200 * V^{2/3}$$

La herramienta LAHARZ



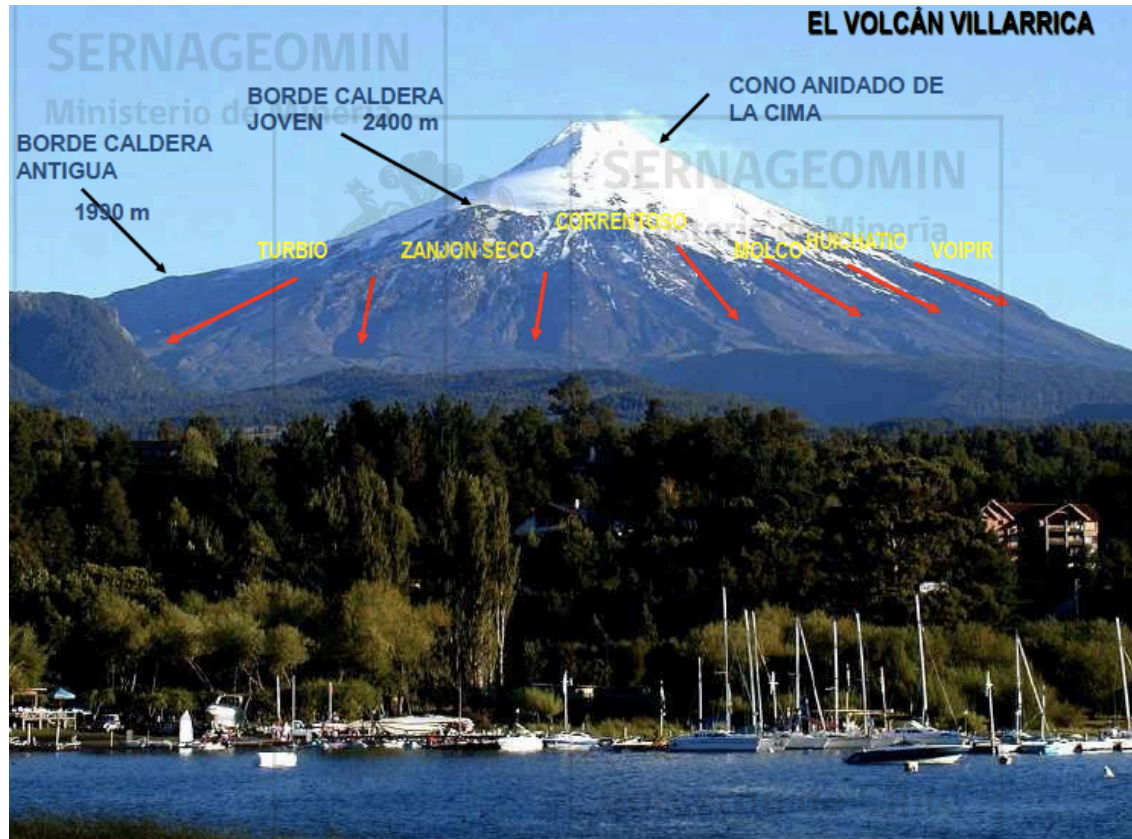
- Este modelo fue implementado en un software llamado LAHARZ.
- La herramienta trabaja en ambiente ArcGIS.
- *Inputs:*
 - Modelo de elevación digital (DEM).
 - Zona distal y proximal (cono H/L).
 - Volumen del lahar.
- *Outputs:*
 - Áreas expuestas a lahares simulados.



Fuente: Iverson y Schilling, 1998.

Volcán a evaluar: Villarrica

- Es considerado uno de los volcanes más activos de América del Sur (Petit-Breuilh and Lobato, 1994; Moreno, 1993).



Fuente: Moreno, 2015.



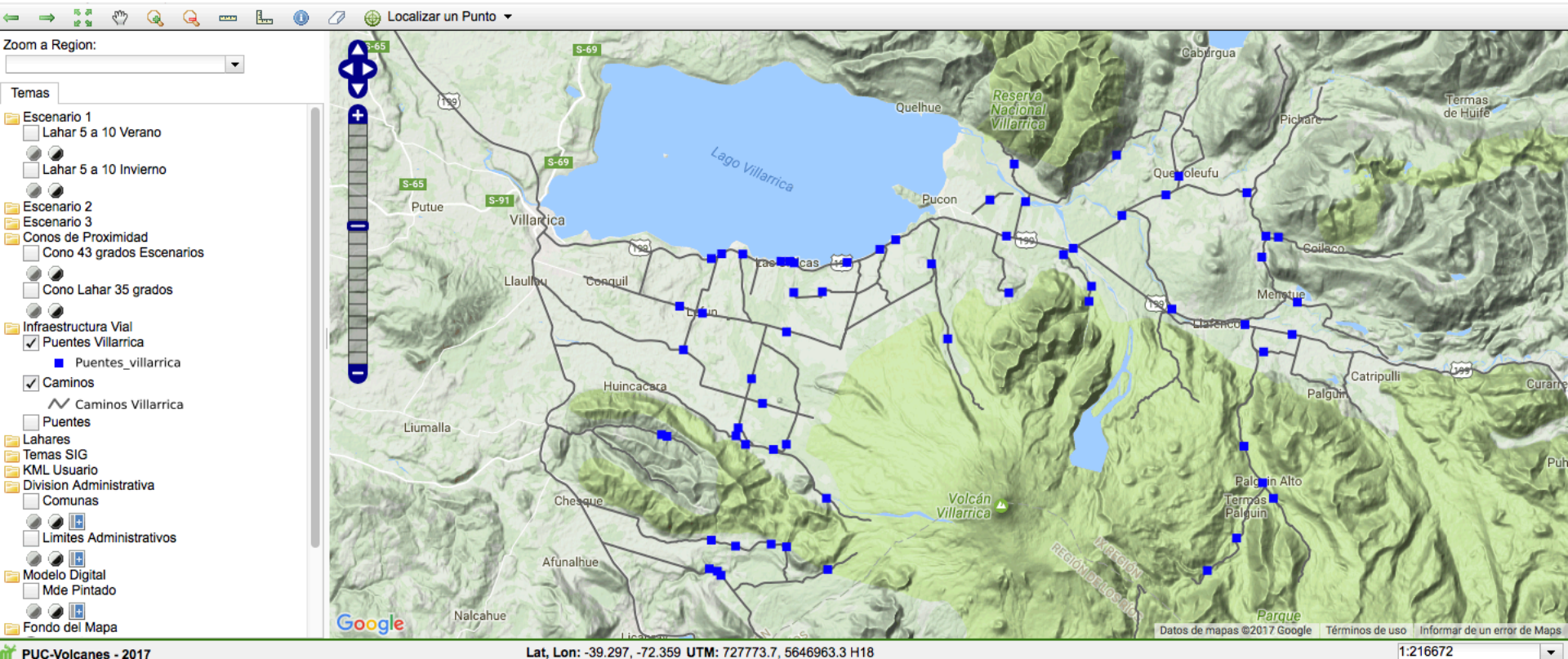
Figura 26. Destrucción del Puente Correntoso entre Villarrica y Pucón por lahares ocurrido durante la erupción de 1971.



Puentes a evaluar: Villarrica-Pucón



- Puentes ubicados entre Villarrica y Pucón:
 - Ruta principal: S-199
 - Rutas secundarias: Segunda Faja (S-887; S-881; S-895; etc.)

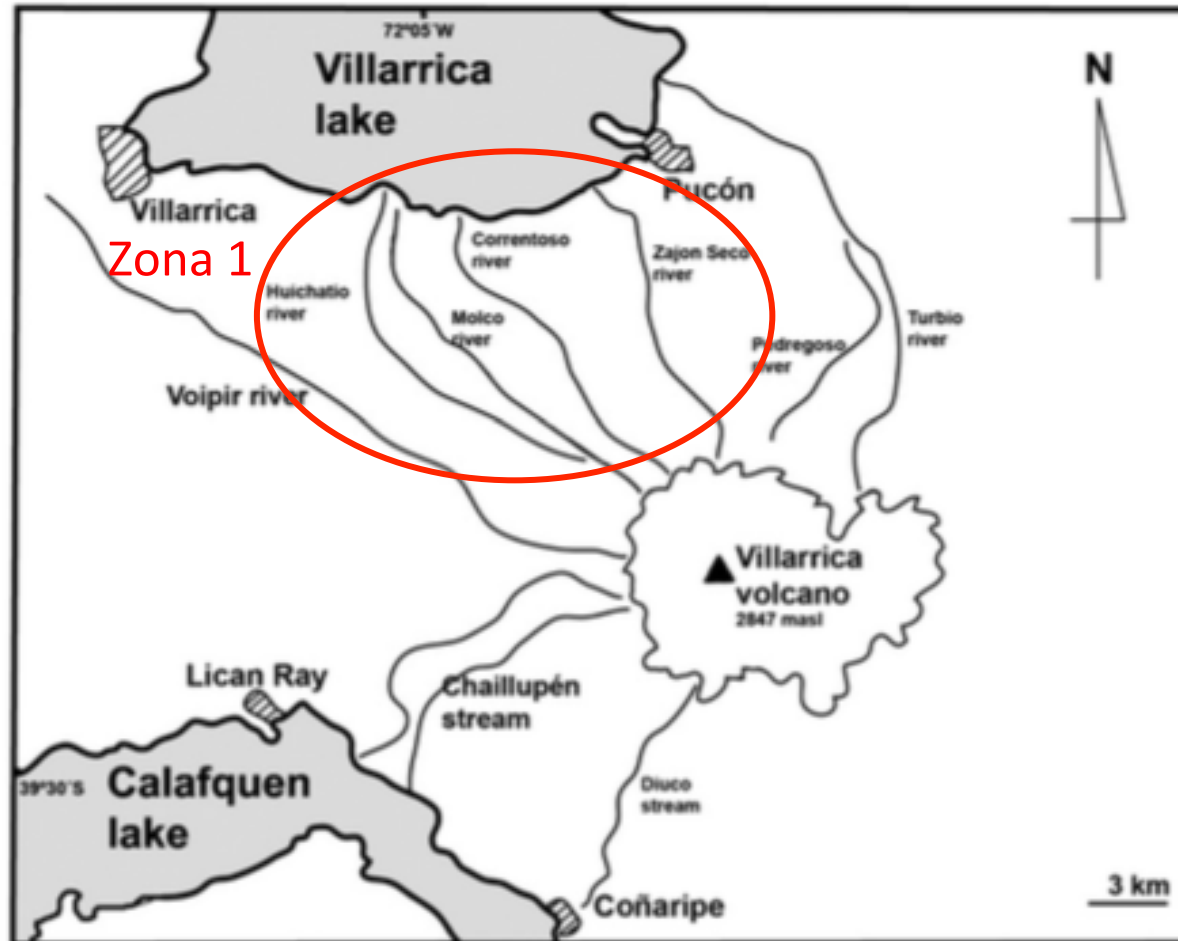


Escenarios de simulación



- Uso de estudio de interés público titulado **“Construcción de Mitigación de Riesgos Volcánicos y Geológicos Asociados, Comunas de Villarrica, Pucón y Curarrehue”** de la DOH (elaborado por INH) como base de definición los escenarios.
- Simulación de ocurrencia de 3 eventos en el Volcán Villarrica:
 - **E1:** Hawaiano-estromboliana (5-10 años de recurrencia) - 1971
 - **E2:** Sub-pliniana (800 años de recurrencia) - 1949
 - **E3:** Pliniana (10.000 años de recurrencia)
- Principales cauces del Volcán Villarrica:
 - **Zona 1:** Zanjón Seco, Correntoso, Molco, Huichatio.
 - **Zona 2:** Chaillupén, Voipir.
 - **Zona 3:** Turbio, Pedregoso, Trancura.

Principales cauces Volcán Villarrica

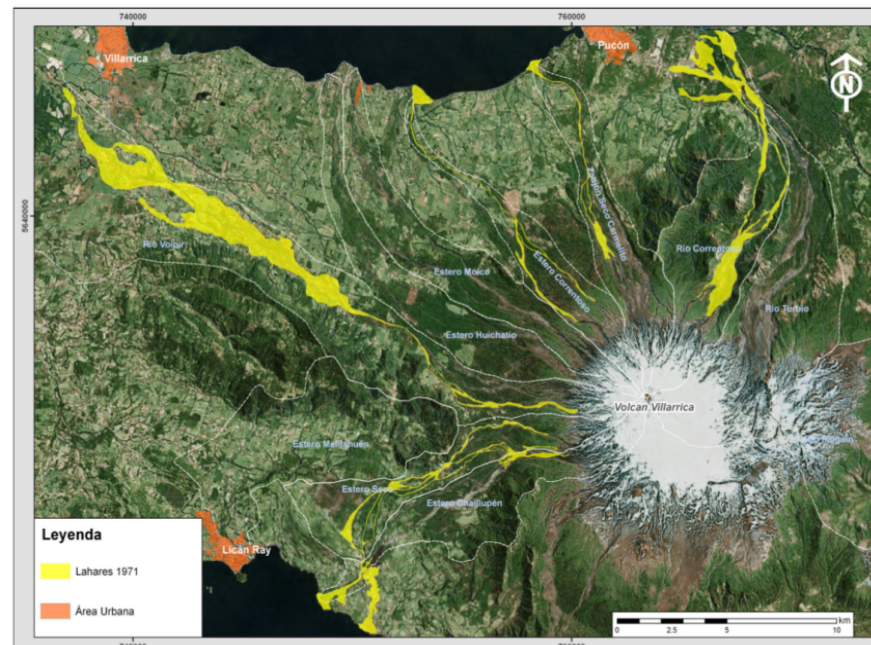


Fuente: Castruccio *et al.*, 2015.

Estimación y calibración de parámetros



- El INH (2013) estimó y calibró parámetros específicos para el Volcán Villarrica utilizando información de la erupción de 1971.
 - Calibración del factor de la sección transversal ($A = C \cdot V^{2/3}$)
 - Cono de energía de zona proximal (H/L)



Fuente: INH, 2013.

Volúmenes de lahares

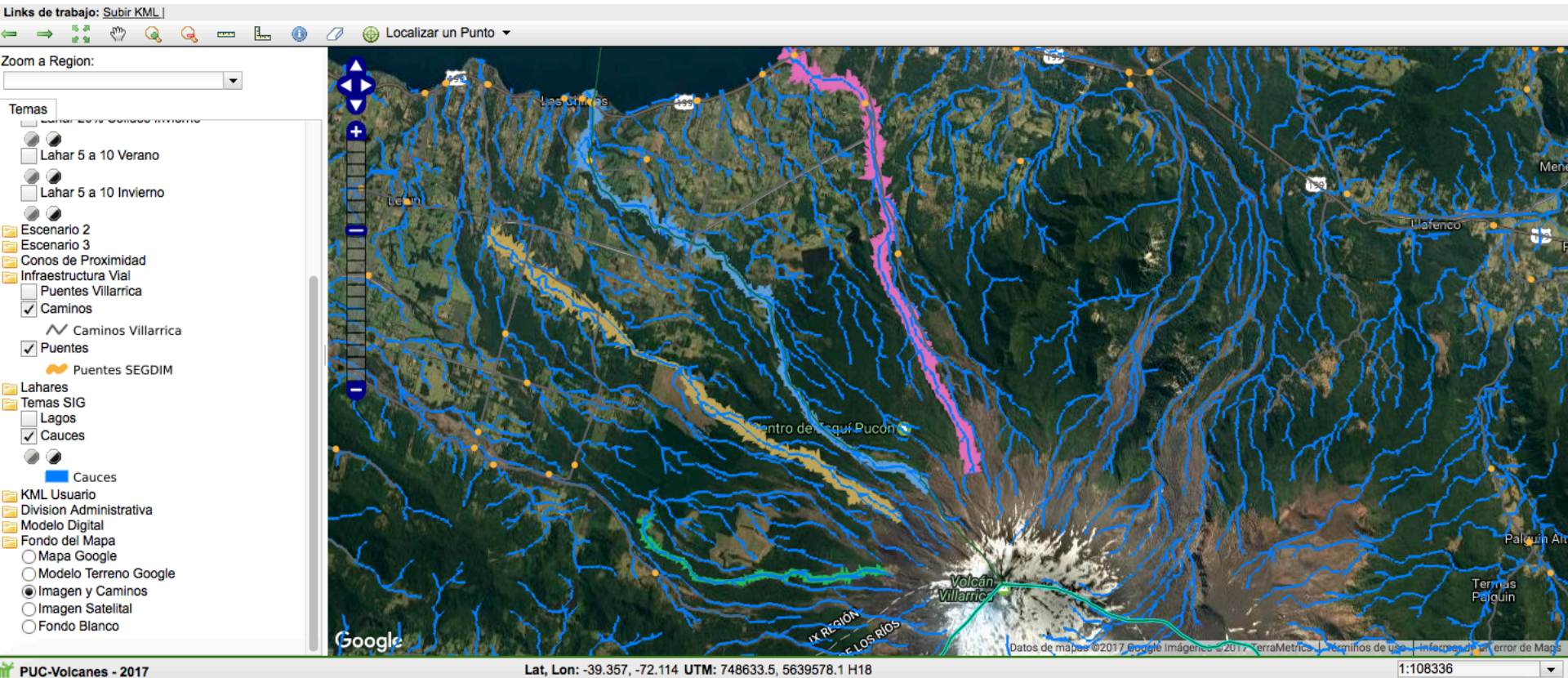


Cauce	Escenario 1 (5-10 años)		Escenario 2 (800 años)		Escenario 3 (10.000 años)	
	Volumen lahar solo hielo (10 ⁶ *m ³)	Volumen lahar hielo+nieve máx (10 ⁶ *m ³)	Volumen lahar solo hielo (10 ⁶ *m ³)	Volumen lahar hielo+nieve máx (10 ⁶ *m ³)	Volumen lahar solo hielo (10 ⁶ *m ³)	Volumen lahar hielo+nieve máx (10 ⁶ *m ³)
Estero Challupén	62.51	71.26	29.28	43.90	325.00	405.00
Estero Seco	28.19	39.41	4.83	7.19	52.50	101.25
Río Voipir	13.72	25.03	3.48	5.17	37.50	97.50
Estero Huichatio	5.53	14.62	0.78	1.12	7.50	43.75
Estero Molco	8.55	23.05	1.24	1.80	12.50	58.75
Estero Correntoso	7.36	16.96	1.80	2.70	20.00	77.50
Zanjón Seco	13.88	24.21	2.58	3.82	27.50	97.50
Río Pedregoso	37.07	51.34	12.14	18.21	135.00	236.25
Río Turbio	150.34	173.91	153.31	229.92	1702.25	1932.50
Total	327.14	439.79	209.44	313.84	2320.00	3050.00

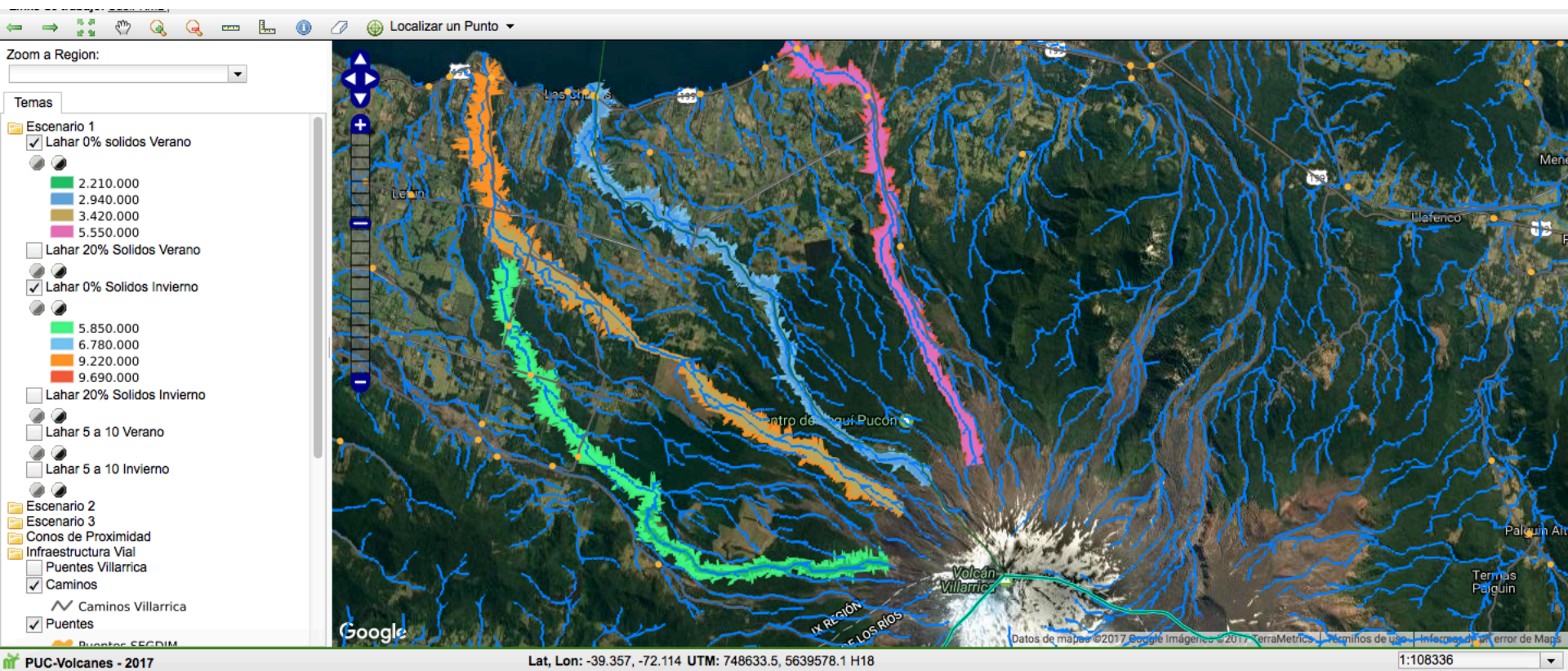
Fuente: INH, 2013.



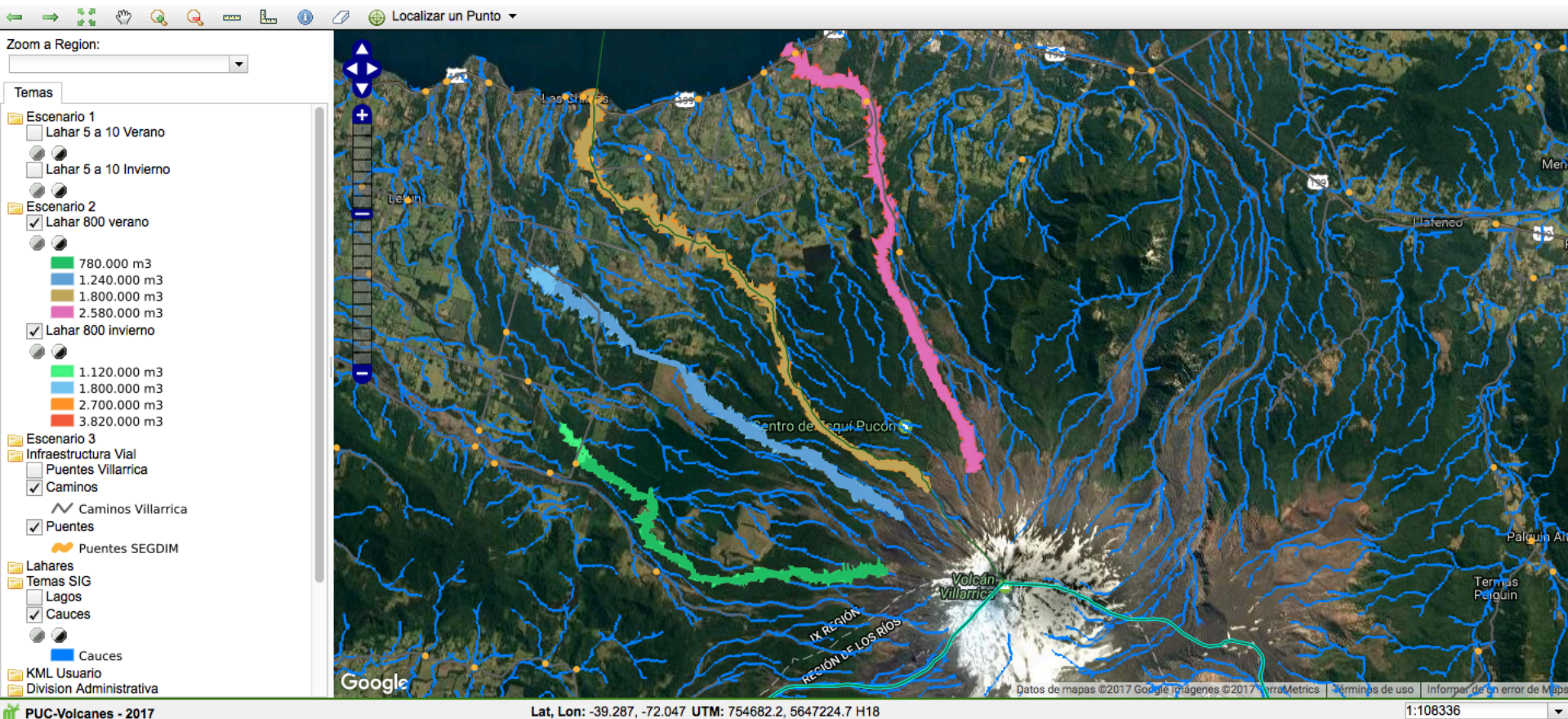
Escenario 1 (5-10 años) verano



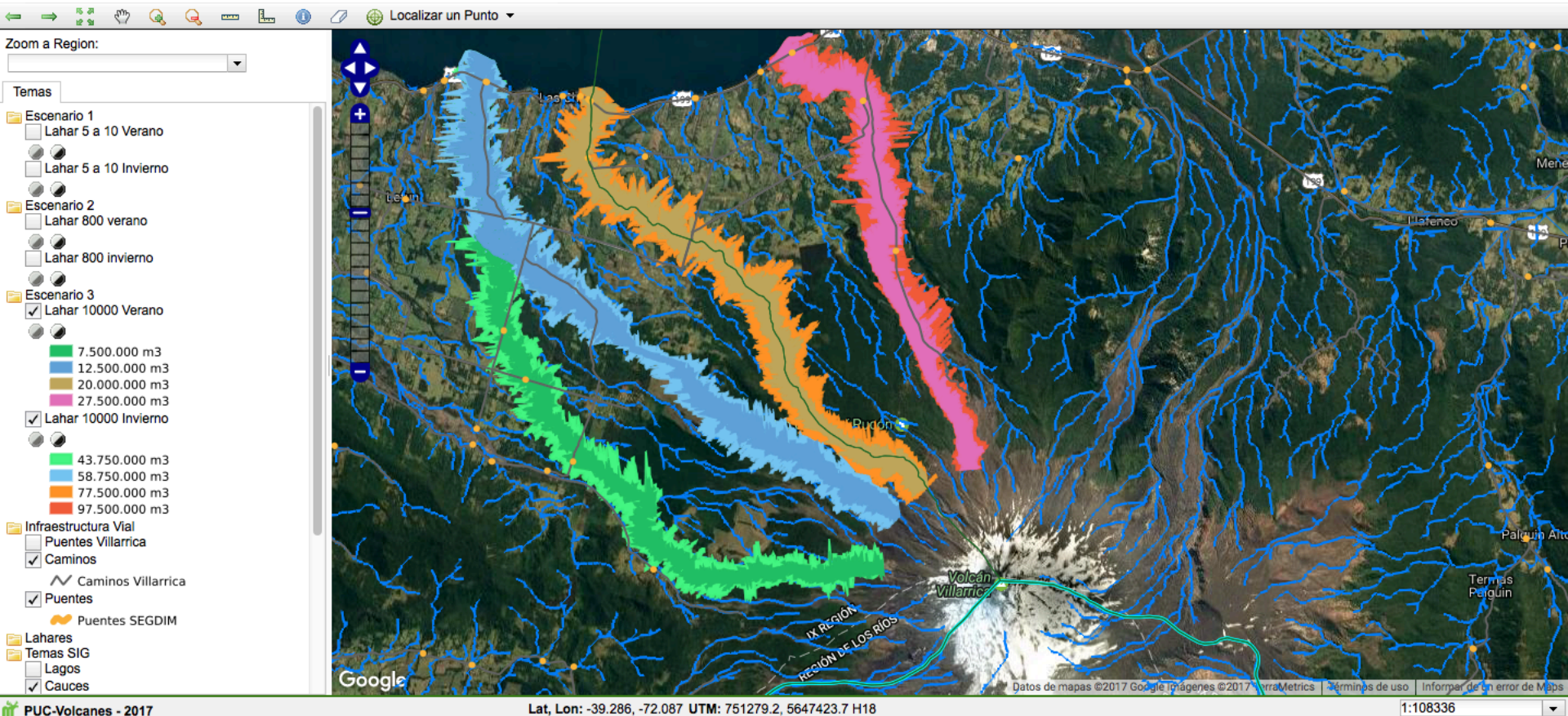
Escenario 1 (5-10 años) verano e invierno



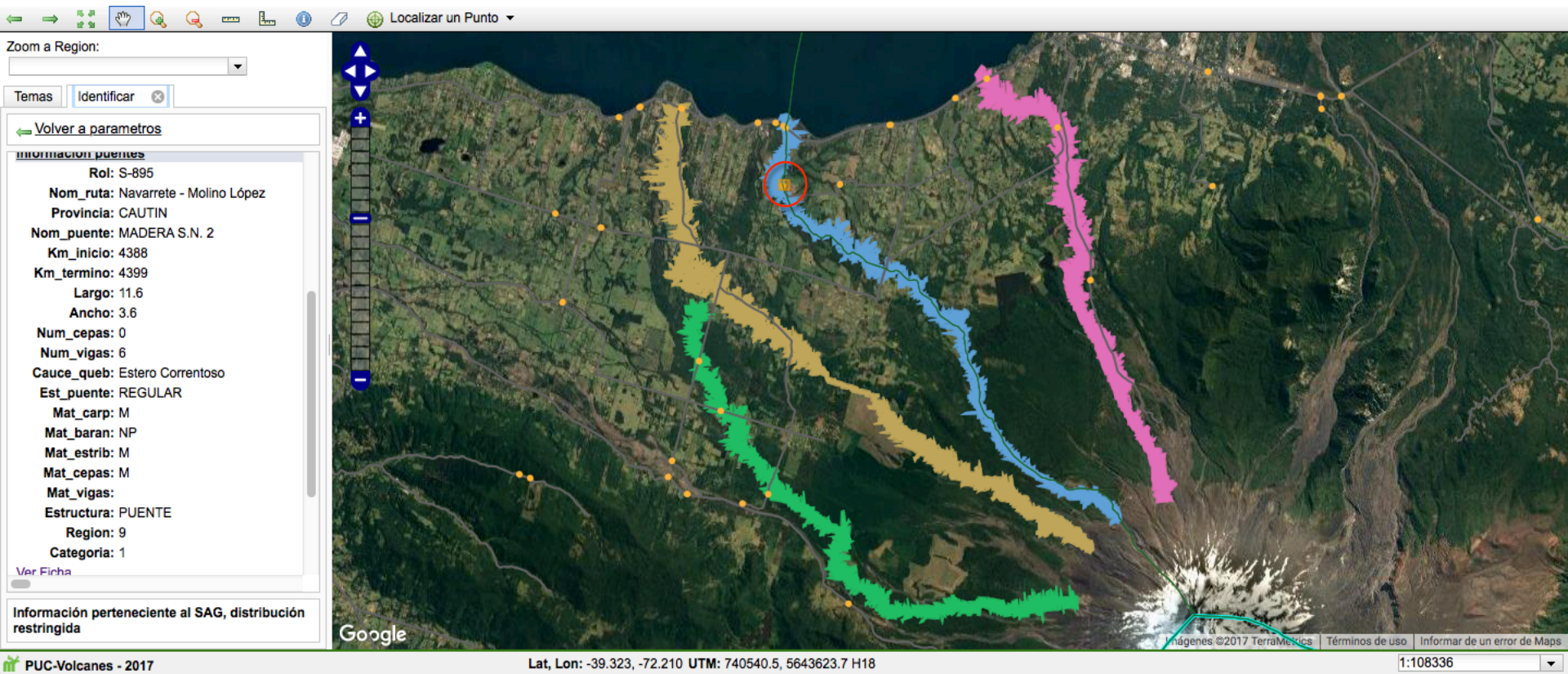
Escenario 2 (800 años) verano e invierno



Escenario 3 (10.000 años) verano e invierno



Puente Madera S/N 2 – Correntoso (1/2)

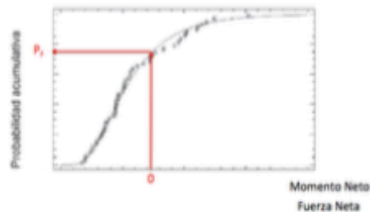
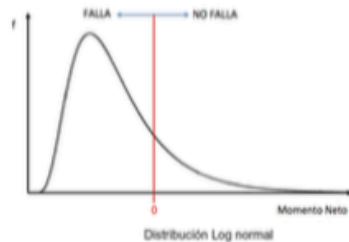


Puente Madera S/N 2 – Correntoso (2/2)



REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

NOMBRE DEL PUENTE	MADERA S/N 2		TIPO DE PUENTE	M - M - M	
EN KM	4,20	DE LA RUTA	NAVARRETE - MOLINO LOPEZ		
CODIGO RUTA	69EB17	EN EL CAUCE	CORRENTOSO		
REGION	ARAUCANIA	PROVINCIA	CAUTIN	COMUNA	PUCON
MATERIAL ESTRIBOS	M	MATERIAL CEPAS	-	MATERIAL TABLERO	M
LONG TOTAL	11,3	ANCHO PASILLOS	-	LUZ MAYOR	-
ANCHO TOTAL	3,85	ANCHO DE CALZADA	3,85	NUMERO TRAMO	-
GALIBO	2,5	ESPESOR DE LOSA	-	TIPO DE CARPETA	MADERA
				TIENE ESVAJE	NO



		ESTRIBOS			CEPAS		TABLERO		PUENTE
		VOLUMEN (MM M3)	MNETO ESPERADO (MN-M)	PROB. FALLA	MNETO ESPERADO (MN-M)	PROB. FALLA	FNETA ESPERADA (MN)	PROB. FALLA	PROB. FALLA
ESCENARIO 1	SOLO HIELO	7,36	1,28	7,20%	-	-	0,1	0,00%	7,20%
5-10 AÑOS	HIELO Y NIEVE MAX	16,96	0,74	17,60%	-	-	0,1	0,00%	17,60%
ESCENARIO 2	SOLO HIELO	0	3,01	0,00%	-	-	0,1	0,00%	0,00%
800 AÑOS	HIELO Y NIEVE MAX	0	3,01	0,00%	-	-	0,1	0,00%	0,00%
ESCENARIO 3	SOLO HIELO	20	-0,13	64,30%	-	-	0,1	0,00%	64,30%
10.000 AÑOS	HIELO Y NIEVE MAX	77,5	-0,51	98,90%	-	-	-0,08	100,00%	100,00%

Conclusiones de la aplicación del modelo

- Puentes con mayor riesgo de colapso ante lahares (**críticos**):
 - Zanjón Seco (Zanjón Seco)
 - Puente Seco (Zanjón Seco)
 - Puente Madera S/N 2 (Correntoso)
 - Puente Conquil (Correntoso)

Rutas Secundarias
- Mayores niveles de intensidad de amenaza de lahares.
- Atributos de los puentes que los hacen más vulnerables ante esta amenaza:
 - Menor ancho (4,0 m – 1 pista)
 - Menor gálibo
 - Material infraestructura y tablero (madera)
 - Mayor pendiente

Menor peso (robustez)

→ Mayor velocidad lahar

Futuras líneas de investigación



Desarrollar fichas de inspección (protocolos) para registrar los efectos de lahares sobre puentes y alcantarillas.

Incorporar criterios sociales y políticos en la evaluación de riesgo:

Tráfico y demanda

Productividad económica (turismo)

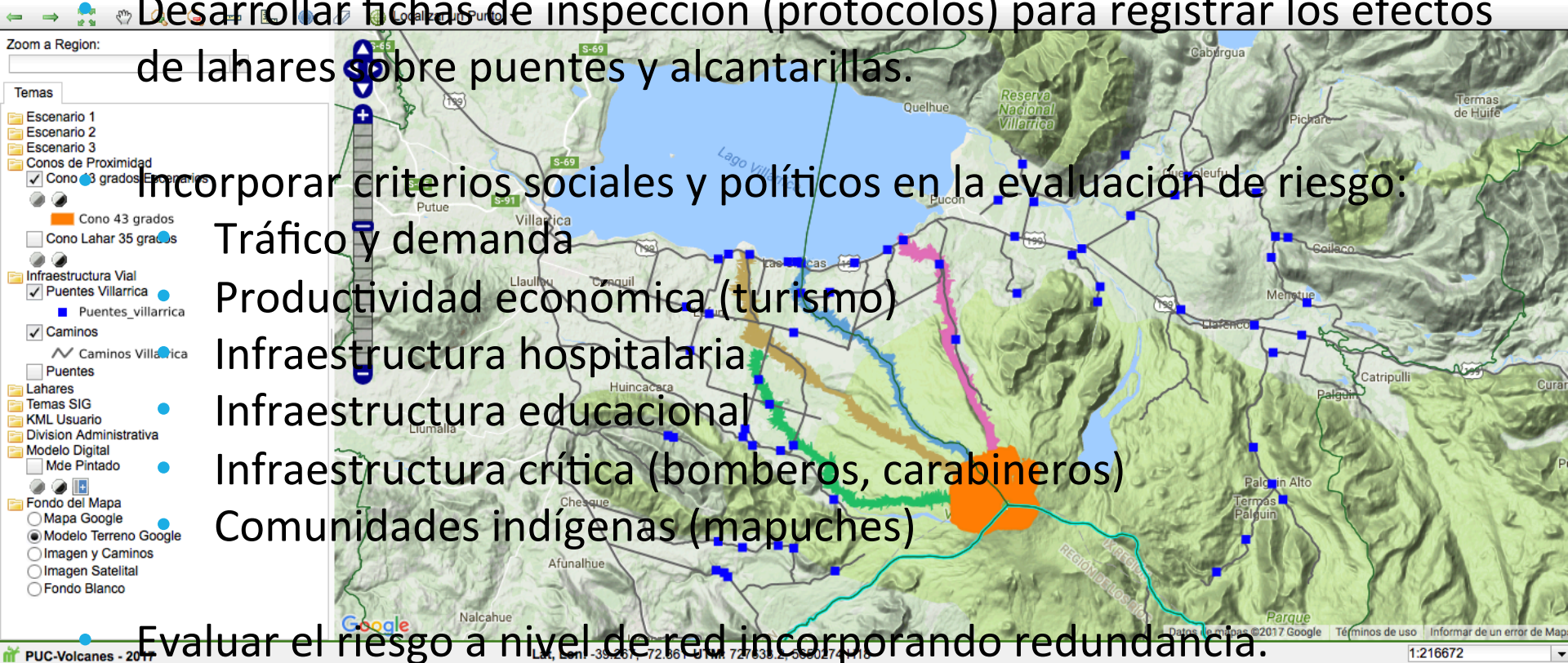
Infraestructura hospitalaria

Infraestructura educativa

Infraestructura crítica (bomberos, carabineros)

Comunidades indígenas (mapuches)

Evaluar el riesgo a nivel de red incorporando redundancia.



INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE MODELOS PARA CUANTIFICAR Y MITIGAR EL RIESGO DE EVENTOS NATURALES EN LA RED VIAL NACIONAL

DESARROLLO, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN MODELO DE RIESGO DE AMENAZA VULCANOLÓGICA



Joaquín Dagá Kunze

Santiago, 28 de Marzo de 2017

I CONCURSO IDeA EN DOS ETAPAS
FONDEF - CONICYT