

Índices y grados de riesgo de inundación comunales en sistemas de alerta: uso de lógica difusa

ARNALDO SANTANDER & XIMENA VARGAS

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Casilla 228/3, Santiago, Chile
asantand@ing.uchile.cl

Resumen Se realiza un resumen teórico y discute sobre las propiedades y alcances del uso de Lógica Difusa (FIS) para la formulación de un sistema experto de interpretación del riesgo de inundación geográficamente agregado, que reviste interés en zonas de monitoreo extensas, donde distintos niveles de gestión requieren información jerarquizada conforme a su “criterio” durante la ocurrencia de episodios de inundaciones globales. Usando información recopilada en la zona central de Chile, se concluye que es posible el uso de los FIS tipo Mandami para generar modelos de interpretación del riesgo a distintas escalas espaciales. Así, se define un índice denominado Grado de Riesgo Comunal, G_r^{Comuna} , que traduce el riesgo en valores discretos a partir de valores difusos.

Palabras claves lógica difusa; inundaciones; tiempo real; sistemas de alerta; índices de riesgo; grados comunales de riesgo

Indices and grades of regional flood risk in a flood alert system: use of fuzzy logic

Abstract Theory and practical aspects related to fuzzy logic implementation in a real time flood warning system are provided. Mandami’s Fuzzy Inference System (FIS) was used to make a spatial (district) aggregated interpretation model. The proposed model was applied on the Mataquito River basin (Chilean Central Valley). A discrete risk degree from continuous fuzzy risk values was made.

Key words fuzzy logic; flooding; real time; warning systems; risk value; district risk degree

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el estado chileno posee una red nacional de monitoreo de datos hidrométricos en tiempo real con aproximadamente 150 estaciones satelitales a lo largo del país que ha empezado a ser empleada en diversos campos de la gestión del recurso hídrico. En este contexto de modernización, los sistemas de alerta temprana de inundaciones constituyen uno de los potenciales usos de la red, por lo tanto, es razonable prever que la experiencia en este ámbito se acrecentará en los próximos años. Entre las componentes de los Sistemas de Alerta en Tiempo Real (SATR) se distinguen los modelos de pronóstico de caudales y modelos de interpretación del estado del sistema para distintas escalas espaciales (Santander, 2004) en los cuales este último queda determinado por el riesgo, que debe evaluarse a través de algún índice. La motivación del estudio de técnicas que permiten una tolerancia en el pronóstico de caudales e interpretación de los sistemas de alerta viene dada principalmente porque, por una parte, el valor cualitativo del riesgo no es excluyente; es decir, si bien es posible establecer intervalos (conjuntos) en los cuales el riesgo es “bajo”, “medio”, etc., por lo general los valores frontera de estos intervalos son “difusos” (los elementos de la intersección pueden pertenecer tanto a uno u otro intervalo). Por otra parte, las singularidades de cada evento hacen prácticamente imposible la modelación de la incertidumbre inherente a la ocurrencia de desastres por inundaciones.

Lógica Difusa nace como una técnica perteneciente al área de la llamada inteligencia artificial y ha dado origen a sistemas expertos y sistemas de control automático, área en que se ha utilizado ampliamente. En particular, permite traducir o interpretar un sistema mediante un conjunto de reglas o hipótesis multivaluadas, a diferencia de la lógica binaria, puesto que no impone en las proposiciones o hipótesis valores discretos de las variables de decisión y consecuencia (falso o verdadero). En consecuencia, lo difuso puede entenderse como la posibilidad de asignar valores de verdad intermedios entre “falso” y “verdadero”. Además, este tipo de esquema es “tolerante” debido a que las causas (variables de entrada) que producen cierto efecto (variable de salida) pueden variar dentro de cierto rango sin que el resultado se altere mayormente.

En este artículo se realiza un resumen teórico y se discute sobre las propiedades y alcances del uso de Lógica Difusa para la interpretación del riesgo de inundación en zonas pertenecientes a la Hoya del Río Mataquito (Provincia de Curicó, VII Región del Maule) mediante la generación de índices de riesgo agregados a escala espacial.

MARCO TEÓRICO

Lógica difusa

Los modelos difusos o FIS (Fuzzy Inference System) se basan conceptualmente en agrupar en subconjuntos las variables de entrada de respuesta similar (salida del modelo), quedando la magnitud de la respuesta determinada por el grado de cumplimiento de las variables de entrada a ciertas sentencias o reglas.

Un conjunto difuso es una función que a cada elemento del universo le asocia su grado de pertenencia, función cuyo dominio es el universo y cuyo recorrido, como se muestra en la Fig. 1, es el intervalo [0,1]. Mediante notación matemática, se define un Conjunto Difuso MF (función de pertenencia), para la variable de entrada x que pertenece al universo X :

$$MF(x) = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad \mu_A: X \rightarrow [0,1] \tag{1}$$

donde la función de pertenencia “ μ_A ” se establece de manera arbitraria.

Las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos se pueden operar entre sí del mismo modo que los conjuntos clásicos; así, las operaciones de intersección, unión y complemento se pueden definir como:

$$\text{Operador } Y: \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x) \tag{2}$$

$$\text{Operador } O: \mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \tag{3}$$

La estructura de las proposiciones lógicas del sistema se pueden expresar considerando que para todas las variables de entrada V_k se dispone de un número de funciones de membresía m , donde las n reglas del modelo R_i se expresan como:

$$R_i: \text{ Si } V_1 \text{ es } MF(1,i) \text{ Y/O } \dots \text{ Y/O } V_k \text{ es } MF(k,i) \quad \text{Y/O } \dots \text{ Y/O } V_p \text{ es } MF(p,i)$$

$$\text{Entonces: Implicancia } i = A_i(V_1, \dots, V_k, \dots, V_p)$$

Donde: $i = \{1, \dots, n\}$, $k = \{1, \dots, p\}$ $\forall k$ es $MF(k,i) = MF(k,i)(V_k)$

Las funciones de implicancia, o consecuencia, A_i constituyen lo que se denomina “fusificado” del FIS, y son definidas de modo arbitrario.

Un criterio para la caracterización de los conjuntos difusos es el de inclusión difusa “S” (Kosko, 1992) que representa el grado en el que un conjunto difuso está incluido en otro. Así, la inclusión difusa de μ_A en μ_B se obtiene como:

$$S(\mu_A, \mu_B) = \frac{1}{Card(\mu_A)} \left[Card(\mu_A) - \int_{z \in Z} \max(0, \mu_A(z) - \mu_B(z)) dz \right] \tag{4}$$

siendo $Card(A)$ la cardinalidad del conjunto A , definida como:

$$Card(A) = \int_{x \in X} A(x) dx \tag{5}$$

Luego, sea z una variable para la cual se determinan n conjuntos difusos “ μ^i ”, entonces la matriz de inclusión difusa “ $S(z)$ ” se expresa como:

$$S(z) = \begin{bmatrix} 1 & \dots & \dots & S(\mu^1, \mu^n) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ S(\mu^n, \mu^1) & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}_{n \times n} \tag{6}$$

La salida o respuesta del FIS se obtiene finalmente mediante el proceso de “desfusificado”, que consiste en la conjunción de las implicancias A_i individuales de cada regla, entregando un valor único de salida del FIS. La metodología de desfusificado depende del esquema tipo de FIS adoptado (Santander, 2004); así, si se utiliza el esquema tipo Mandami (Mandami *et al.*, 1975) cada función de implicancia A_i será un conjunto difuso, siendo el fusificado de cada regla (regla i -ésima) el área bajo el truncado de la función de implicancia respectiva. Esta área, tal como se muestra en la Fig. 1, queda definida por el valor de la intersección o unión de las funciones de pertenencia, las cuales están evaluadas en sus respectivas variables de entrada. Luego de calcular las implicancias de todas las reglas se realiza la conjunción los conjuntos obtenidos. En el esquema de la Fig. 2, el conjunto A (salida difusa) representa esta operación como:

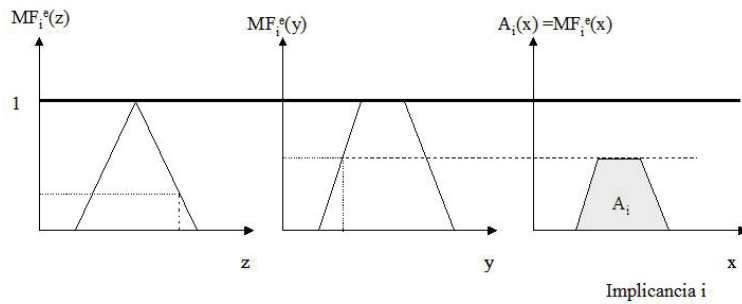


Fig. 1 Esquema de implicancia FIS tipo “Mandami” con funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales.

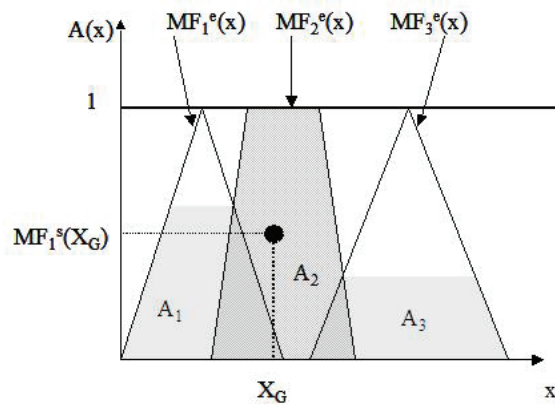


Fig. 2 Esquema “desfusificado” FIS tipo “Mandami” considerando tres reglas y la operación unión de las implicancias A_i .

$$A = \bigcup_{i=1}^n A_i \tag{7}$$

Para obtener el valor de las variables “desfusificadas”, se emplea el centroide “ X_G ”, tal como se aprecia en el ejemplo de la Fig. 2, que corresponde a la proyección del valor esperado de A en el universo X :

$$x_G = \frac{\int_{xeX} a(x) \cdot x dx}{Card(a)} \tag{8}$$

Índice de Riesgo I_R

El Índice de Riesgo es un instrumento abstracto de evaluación y toma de decisión en tiempo real, por lo que debe ser fácilmente interpretable en términos cualitativos. Además, dicho indicador tiene la propiedad de evaluar en términos jerárquicos el nivel de riesgo de los elementos afectados, según la importancia y vulnerabilidad de los mismos. Se define el índice como una función f monótonamente creciente con respecto a las variables E (Elemento), A (Amenaza) y V (Vulnerabilidad):

$$I_R = f(E, A, V) \tag{9}$$

Los Elementos bajo riesgo E están agrupados de manera de establecer jerarquías y analogías entre los sectores amagados. La amenaza A se define como la razón entre el valor del caudal observado y un caudal umbral de falla “ Q_{falla} ” en el cauce asociado a la inundación. La vulnerabilidad V representa la propensión de un elemento a dañarse e incluye de forma implícita las dificultades para la recuperación del mismo. No se considera explícitamente la duración de la falla en la formulación del Índice de Riesgo, puesto que en general en cauces como los estudiados, donde dominan los efectos inerciales sobre los gravitacionales (torrentes), la duración de la inundación tiene menor importancia que la magnitud de la misma.

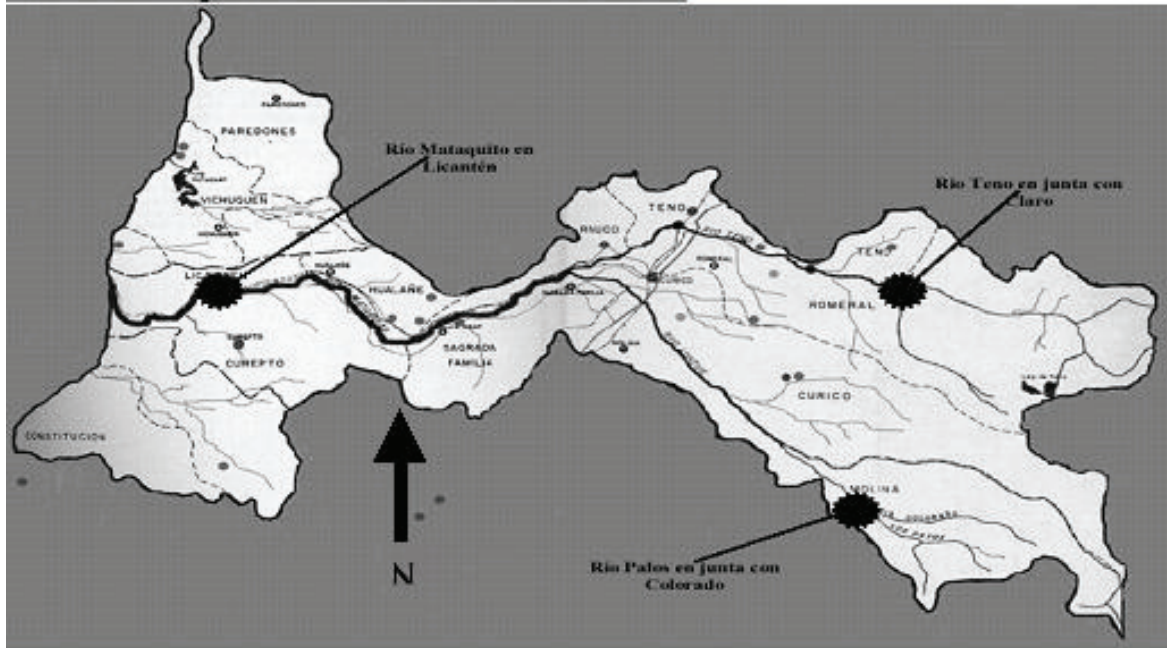


Fig. 3 Zona de estudio perteneciente a la Provincia de Curicó, Chile.

APLICACIÓN Y RESULTADOS

Zona de estudio

La investigación se desarrolló en la Provincia de Curicó, en particular en la hoya del río Mataquito (ver Fig. 3) en la cual se encuentran las estaciones limnigráficas Mataquito en Licantén, Palos en junta con Colorado y Teno en junta con Claro que definen cuencas de superficies de 5923, 514 y 1198 km², respectivamente. El régimen del río Mataquito es de tipo nivo pluvial, aunque las crecidas de mayor envergadura, e históricamente más destructivas, se producen en el período pluvial.

Uso de FIS Mandami para la generación de I_R comunales

La estructura y parámetros de la ecuación (9) se determina a partir de un catastro de los elementos amagados en la zona de estudio, en el cual se identificaron el tipo de falla, obras afectadas y eventos para los cuales se registraron las inundaciones (Santander, 2004). Así, los índices de riesgo individuales de los puntos o elementos bajo riesgo se evalúan como:

$$I_T^k(t) = 48.6 \times A(t^2) \times V^{0.122} \times E^{0.139} \quad (10)$$

donde los parámetros: “ Q_{falla} ”, V y E dependen del sector amagado (ver Tabla 1).

En la obtención de los índices comunales $I_R^{Comuna}(t) = FIS_{Mandami}(I_R^1(t), \dots, I_R^p(t))$ se ocupa un FIS Mandami de cuatro reglas ($i = 1, \dots, 4$), aplicando la operación Unión de las funciones de pertenencia MF_k^i . Se emplean conjuntos difusos trapezoidales tanto para las funciones de implicancia A_i como para las funciones de pertenencia $MF_k^i = MF_i$ siendo estas últimas iguales todas las variables de entrada. Las variables de entrada corresponden a los índices de riesgo individuales de los elementos pertenecientes a la comuna ($I_R^k(t)$ donde $k = (1, \dots, p)$ y $p =$ no. de zonas amagadas dentro de la comuna). Los parámetros de los conjuntos difusos se indican en la Tabla 3. Para generar un Índice de Riesgo comunal $I_R^{Comuna}(t)$ escalado se considera que: $X_G(A_1) = 30$, $X_G(A_4) = 157$ definiendo como valor máximo $I_R^{max} = 100$ y $V_k = I_R^k(t)$.

$$I_R^{Comuna}(t) = 100 \left[\frac{FIS_{Mandami}(V_1, \dots, V_P) - 30}{127} \right] \quad (11)$$

Se incorpora el concepto de Grado de Riesgo Comunal $G_r^{Comuna}(t)$ como un valor discreto, de tal forma que: $G_r^{Comuna}(t) = \{1, 2, 3, 4\}$, evaluado como:

$$\text{Sea : } \text{Soporte } (A_i) = [\alpha_i, \beta_i]_{i=\{1,2,3,4\}}$$

$$\text{Si } \alpha_1 \leq I_r^{\text{Comuna}}(t) \leq \alpha_2 \Rightarrow G_r^{\text{Comuna}}(t) = 1$$

$$\text{Si } \beta_3 \leq I_r^{\text{Comuna}}(t) \Rightarrow G_r^{\text{Comuna}}(t) = 4$$

$$\text{Si } \alpha_4 \leq I_r^{\text{Comuna}}(t) < B_3 \Rightarrow G_r^{\text{Comuna}}(t) = 3$$

$$\forall i \in \{2,3\} :$$

$$\text{Si } \beta_{i-1} \leq I_r^{\text{Comuna}}(t) \leq \alpha_{i+1} \Rightarrow G_r^{\text{Comuna}}(t) = i$$

$$\text{Si } \alpha_i \leq I_r^{\text{Comuna}}(t) < \beta_{i-1} \Rightarrow G_r^{\text{Comuna}}(t) = \begin{cases} i-1 & \text{Si } S(A_{i-1}, A_i) \geq S(A_i, A_{i-1}) \\ i & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (12)$$

donde $\text{Soporte}(A_i)$ es el intervalo en el cual la implicancia i -ésima es distinta de cero y $S(A)$ corresponde a la matriz de inclusión difusa:

$$S(A) = \begin{bmatrix} & A_1 & A_2 & A_3 & A_4 \\ A_1 & 1 & 1/12 & 0 & 0 \\ A_2 & 1/2 & 1 & 1/8 & 0 \\ A_3 & 0 & 1/20 & 1 & 1/8 \\ A_4 & 0 & 0 & 1/72 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

El cálculo de los índices se basó en los parámetros indicados en la Tabla 1. En las comunas de Licantén y Hualañé se obtuvo un único índice de riesgo agregado que representa a ambas, ya que por su cercanía a la desembocadura del río Mataquito las amenazas de inundación en éstas están directamente ligadas a crecidas en dicho cauce.

Tabla 1 Parámetros del índice de riesgo I_R .

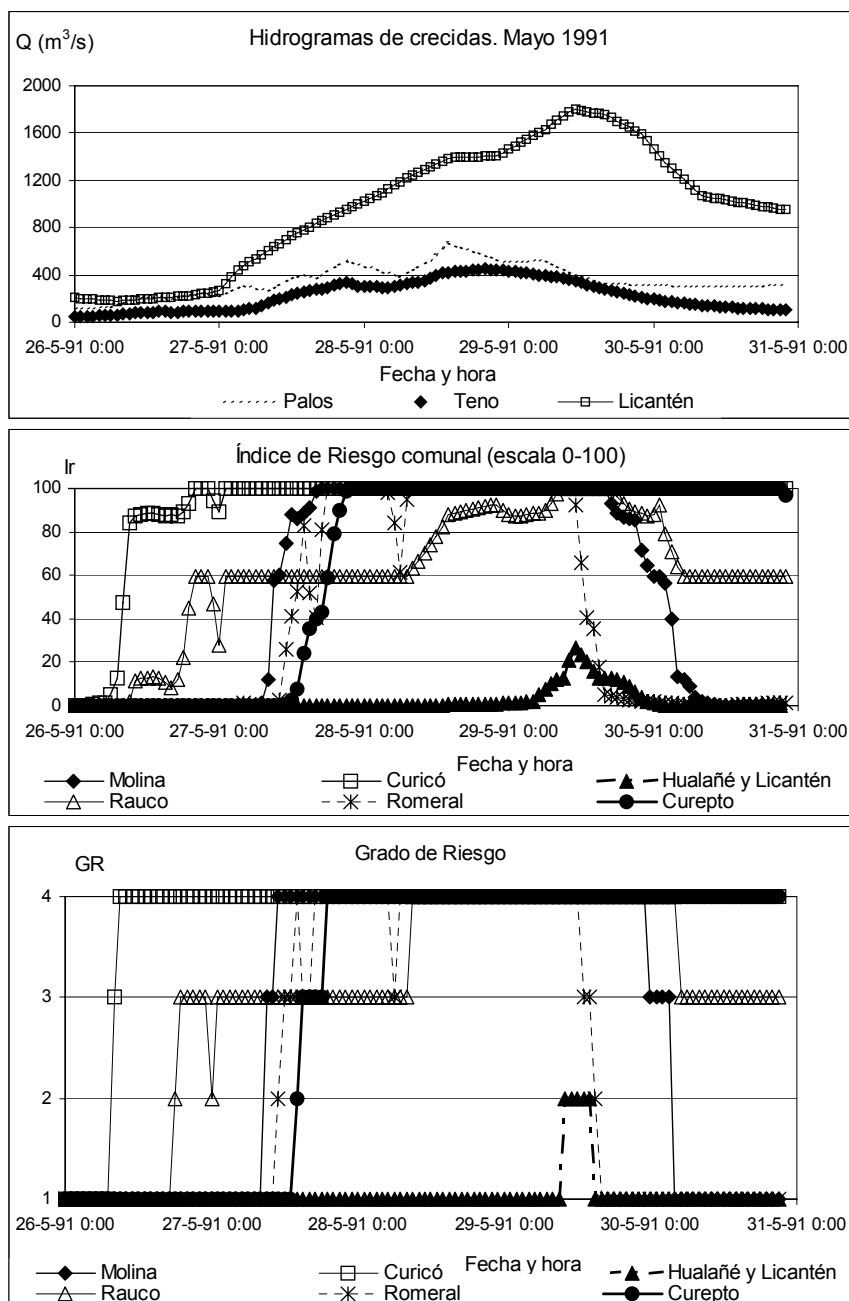
Comuna	Punto amagado	Caudal de falla ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Vulnerabilidad	Elemento	Estación Fluviométrica
Curepto	28	800	1	50	Mataquito en Licantén
	15	210	3	50	Teno en Claro
	13	64	2	100	Palos en Colorado
	14	64	2	100	Palos en Colorado
Hualañé	35	2700	1	50	Mataquito en Licantén
	2	240	3	50	Palos en Colorado
	3	240	3	50	Palos en Colorado
	4	240	3	40	Palos en Colorado
	5	240	2	50	Palos en Colorado
	6	240	3	40	Palos en Colorado
	7	160	3	40	Palos en Colorado
	8	160	3	40	Palos en Colorado
Licantén	141	1700	3	40	Mataquito en Licantén
Rauco	46	210	2	60	Teno en Claro
	47	1500	2	50	Mataquito en Licantén
Romeral	40	370	3	40	Teno en Claro
	41	370	3	40	Teno en Claro

Tabla 2 Antecedentes periodísticos en evento del 28 a 30 de mayo de 1991.

Fecha	Descripción	Comuna afectada
29-05	Aislamiento de la localidad de Los Queñes	Romeral
29-05	Desborde del río Teno provoca corte de camino	Rauco
30-05	Corte de camino ruta J-60	Licantén
30-05	Anegamiento en la comuna de Curepto por desborde del río Mataquito	Curepto
30-05	Río Lontué amenaza con desbordarse	Molina

Tabla 3 Parámetros conjuntos difusos.

Funciones de pertenencia “ $MF^i(V_k)$ ”	Funciones de implicancia $A_i(I_r^{Comuna(i)})$
MF1 = Trapezoidal [0,0,60,80]	A1 = Trapezoidal [0,0,60,60]
MF2 = Triangular [60,80,100]	A2 = Triangular [50,60,70]
MF3 = Triangular [80,100,120]	A3 = Triangular [60,90,110]
MF4 = Trapezoidal [100,120, Ω , Ω] (Donde: $\Omega \rightarrow \infty$)	A4 = Trapezoidal [100,120,200,200]

**Fig. 4** Evento del 28 a 30 de Mayo de 1991. (a) hidrogramas de crecidas; (b) índices de riesgo de inundación comunales y (c) grados de riesgo de inundación comunales.

El resultado de la aplicación tanto de los índices de riesgo comunales “ I_r^{Comuna} ”, como de los grados de riesgo “ G_r^{Comuna} ”, para la crecida ocurrida entre los días 28 a 30 de Mayo de 1991, se presenta en la Fig. 4. Se aprecia que tanto los I_r^{Comuna} como los G_r^{Comuna} son consistentes con respecto a los hidrogramas registrados, mostrados también en dicha figura. Igualmente, estos resultados están en conformidad con el catastro de inundaciones y zonas amagadas en este evento, resumido en la Tabla 2.

Se observa que los índices agregados de las comunas de Licantén y Hualañé son siempre relativamente bajos, puesto que éstas presentan elementos con umbrales de falla muy disímiles (Tabla 1), lo que queda de manifiesto en la Tabla 2 pues se registran problemas en la comuna de Licantén y no en Hualañé. En la comuna de Curicó hay sectores que presentan inundaciones frecuentes, por consiguiente tienen bajos valores del umbral de falla, esto incide en que ésta sea la comuna más susceptible a presentar índices de riesgo altos; luego siguen las comunas de Curepto, Molina, Rauco y Romeral.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten destacar los siguientes aspectos:

- Los FIS Mandami permiten generar modelos de interpretación del riesgo a distintas escalas espaciales.
- El índice G_r^{Comuna} , basado en las propiedades de la inclusión difusa, traduce el riesgo en valores discretos a partir de valores difusos.
- De la definición del G_r^{Comuna} se concluye, que este índice se fundamenta en el siguiente criterio: “Los elementos pertenecientes a la intersección de dos conjuntos difusos pertenecen en mayor medida al conjunto de menor tamaño de ambos”.

REFERENCIAS

- Kosko, B. (1992) *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Mandami, E. H. & Assilian S. (1975) An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man-Machine Studies* 7(1), 1–13.
- Santander, A. (2004) *Uso de Lógica Difusa para la estimación de Índices de Riesgo y Falla de Obras Hidráulicas en Tiempo Real*. Tesis para optar al título de ingeniero civil y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Chile.
- Vargas, X. & Santander, A. (2002) *Uso de Lógica Difusa para la estimación de Índices de Riesgo de Inundación y falla de Obras Hidráulicas en Tiempo Real*. In: *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, La Habana, Cuba.