

# Metodología para el análisis de riesgo en estructuras de riego

José Luis Arumí

Universidad de Concepción, Chile

David Jones

Universidad de Nebraska-Lincoln, Estados Unidos

*Durante su vida útil, las estructuras de riego están expuestas a daños causados por inundaciones, terremotos o simplemente, mal manejo. Algunas fallas incluso pueden ocasionar accidentes que contaminen las fuentes de agua utilizadas para el riego. Por esta razón, el análisis de riesgo debe considerarse dentro del diseño y la evaluación de las estructuras o sistemas de riego. Este documento presenta una metodología para el análisis de riesgo que combina dos técnicas diferentes: el uso de árbol de análisis para el estudio del sistema y el uso de la teoría de los números difusos para el manejo de la incertidumbre. La combinación de ambas técnicas produce una metodología simple, que puede ser utilizada como complemento para el diseño y la evaluación de estructuras y sistemas de riego. Como ejemplo de aplicación de la metodología, se presenta el análisis del riesgo de contaminación accidental asociado con un sistema de fertirrigación después de sufrir una detención brusca de la bomba debido a un corte de energía. El análisis demuestra que la válvula de retención tiene un papel muy importante en disminuir el riesgo de derrames accidentales de químicos en la fuente de suministro de agua. Un ejemplo adicional presenta el análisis del riesgo de colapso de un canal de riego asociado con un sismo de intensidad VIII en la escala modificada de Mercalli.*

**Palabras clave:** estructuras de riego, fertirrigación, riesgo, números difusos.

## Introducción

Durante los últimos veinte años, Chile ha experimentado un masivo desarrollo en la tecnología de riego asociado con el proceso de modernización general que ha vivido el país. Como consecuencia de esta modernización se abrieron nuevos mercados para los productos agrícolas chilenos tanto en Europa como en Norteamérica, sin embargo, estos mercados presentan una alta competitividad, situación que causa una fuerte presión por la mejora de la calidad de los productos agrícolas. Por parte de los agricultores existe un fuerte interés en incorporar nuevas tecnologías. Aun así, muchas veces no disponen de los recursos para adquirir sistemas innovadores. Por este motivo es frecuente que se transformen sistemas existentes para incorporar nuevas tecnologías. Esta situación ha causado desorden en el uso del agua para riego, porque los agricultores no tienen control sobre la operación de sus equipos y sistemas de riego.

El Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad de Concepción, Chile, ha trabajado por muchos años en la evaluación de sistemas de riego, manteniendo una activa línea de investigación en dicha área, con el propósito de colaborar en el mejoramiento del uso del agua en la agricultura. Consecuente con esta línea de trabajo, este documento presenta un nuevo aporte para la metodología de evaluación de sistemas de irrigación. La mejora de esta metodología consiste en la incorporación de dos técnicas asociadas con el análisis de riesgo: el uso del árbol de análisis para un evento y la utilización de números difusos.

## Revisión bibliográfica

### *Análisis de riesgo*

El análisis de riesgo consiste en el estudio de eventos indeseables que pueden ocurrir en un proceso o sistema durante su vida útil. Dicho análisis debe incluir to-

das las posibles causas y seguir las consecuencias de estos eventos (Boykin *et al.*, 1986). Como ejemplo de riesgo, las estructuras de riego están sujetas a posibles daños, producto de eventos como terremotos, inundaciones, sabotajes o simplemente, malos manejos.

Cuando el riesgo se origina en una situación imprevisible, como un terremoto o una inundación, se le denomina evento inicial. El análisis en este caso consiste en la evaluación de la probabilidad de un accidente resultante del evento inicial y la secuencia de fallas o faltas en el sistema (Tanaka *et al.*, 1983). La metodología usada para esto se denomina árbol de análisis para un evento.

El árbol de análisis se inicia con un evento definido. Después de este evento, cada componente del sistema tiene un posible estado de falla o éxito. Partiendo con el evento inicial y siguiendo las posibles consecuencias, se pueden definir los posibles escenarios para un accidente (Weihsing y Eisenhauer, 1991). Si las probabilidades de falla o éxito de cada componente del sistema son conocidas, es posible obtener la probabilidad de ocurrencia de un accidente usando una combinación de las operaciones probabilísticas "Y" y "O" (Tanaka *et al.*, 1983).

#### Números difusos

En muchas áreas de la ingeniería, la incertidumbre es un importante factor que debe tomarse en cuenta. Para esto, un criterio tradicional ha sido el sobredimensionamiento de los diseños. No obstante que esto muchas veces es caro y desperdicia recursos, cuando no se dispone de otra herramienta, el uso del diseño conservador ha sido siempre satisfactorio. Sin embargo, la tecnología de la que se dispone actualmente permite obtener y manejar la información de manera más fácil, lo cual ha permitido el desarrollo de nuevos métodos para el manejo de la incertidumbre y la modelación de procesos. El uso de métodos estadísticos y modelos estocásticos es un ejemplo de esta tendencia.

Los métodos estadísticos tradicionales fallan cuando los datos son escasos, imprecisos, imperfectos o bien cuando no se conoce en forma adecuada el problema. En este tipo de escenario, el uso de números difusos entrega un enfoque alternativo y permite la incorporación del conocimiento e información empírica que se tiene sobre el problema en estudio. La teoría de los conjuntos difusos (*fuzzy set theory*) se define como un área de las matemáticas aplicada a resolver el problema de la incertidumbre, producto de la falta de bordes bien definidos (Gui y Goering, 1990). Esta teoría es una aplicación de la teoría de conjuntos, donde los elementos que pertenecen al conjunto están definidos

por una función de correspondencia (Fedrizzi *et al.*, 1991). Dicha función permite que un concepto vago pueda ser caracterizado por un conjunto difuso. Como ejemplo de esto, se puede tomar el caso del siguiente conjunto:

Sea  $A$  el conjunto de todos los estudiantes altos en un curso de primer año de ingeniería:

$$A = \{(x, f_{(x)}) / x \text{ es alto}\}$$

Como el término "alto" se puede entender o definir de distintas formas, la definición del conjunto  $A$  es imprecisa. En este caso, se puede crear un conjunto difuso definiendo la siguiente función de correspondencia:

$$f_{(x)} = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 1.80 \text{ (m)} \\ 1 - 10 \cdot (1.90 - x) & \text{si } 1.80 \leq x \leq 1.90 \text{ (m)} \\ 0 & \text{si } x > 1.90 \text{ (m)} \end{cases}$$

En este ejemplo se puede ver que la función varía entre 0 y 1. Cuando  $f_{(x)} = 0$ ,  $x$  no es miembro del conjunto (esto quiere decir que si el estudiante es más bajo de 1.80 metros, no se considera alto). Si  $f_{(x)} = 1$ , entonces  $x$  está totalmente dentro del conjunto (un estudiante sobre 1.90 metros, definitivamente es alto). Los valores de la función entre 0 y 1 significan que existe un parcial grado de correspondencia (1.84 puede ser considerado más o menos alto).

#### Operaciones de números difusos

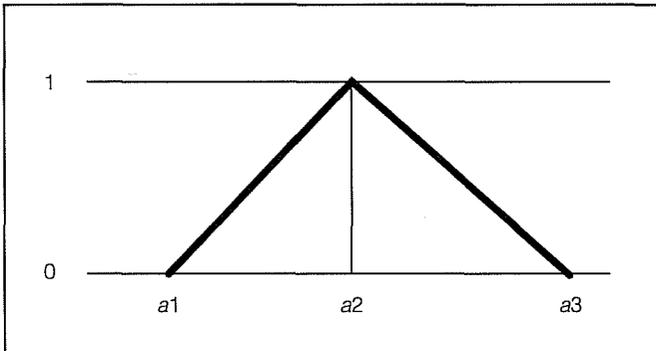
Los números difusos triangulares pueden definirse a través de la siguiente función de correspondencia:

$$f_{(x)} = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a_1 \\ (x - a_1) / (a_2 - a_1) & \text{si } a_1 \leq x < a_2 \\ 1 & \text{si } x = a_2 \\ 1 - (x - a_2) / (a_3 - a_2) & \text{si } a_2 < x \leq a_3 \\ 0 & \text{si } x > a_3 \end{cases}$$

Esta función define un conjunto difuso caracterizado por los valores  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ . Este conjunto difuso (ilustración 1) se denomina número difuso triangular y es representado como: NDT( $a_1, a_2, a_3$ ), donde  $a_1$  y  $a_3$  son los valores mínimo y máximo posibles para el conjunto y  $a_2$  corresponde al valor más posible que puede tomar el conjunto. Este último se denomina valor punta.

El álgebra de los números difusos permite el uso de la teoría de los números difusos para solucionar problemas complejos que involucran elementos interrela-

Ilustración 1. Número difuso triangular NDT(  $a_1, a_2, a_3$ ).



cionados. Dubois y Prade (1978) y Kaufmann y Gupta (1991) presentan diferentes operaciones matemáticas con números difusos y la definición de la teoría sobre la cual se basan esas operaciones. Además, Tanaka *et al.* (1983) presentan el uso de números difusos en un árbol de análisis para un evento. En este trabajo se utilizan dos operaciones para números difusos triangulares:

Sean:

$$A = \text{NDT} (a_1, a_2, a_3)$$

$$B = \text{NDT} (b_1, b_2, b_3)$$

Las operaciones de multiplicación y adición pueden ser aproximadas con las siguientes expresiones (Tanaka *et al.*, 1983):

$$A \cdot B = (a_1 \cdot b_1, a_2 \cdot b_2, a_3 \cdot b_3)$$

$$1 - A = (1 - a_1, 1 - a_2, 1 - a_3)$$

## Metodología

Esta metodología se creó para la evaluación cualitativa del riesgo asociado con estructuras y sistemas de riego. En general, la metodología puede usarse para evaluar el riesgo de destrucción de una estructura causado por un sismo o una inundación. También se puede utilizar para evaluar el riesgo de deterioro de un sistema ocasionado por mal manejo o por una decisión errónea. En este punto, la metodología será presentada en una forma general para posteriormente utilizarse en el análisis de dos casos diferentes: el primero corresponde a la evaluación del riesgo de contaminación accidental en un sistema de fertirrigación usado en la

zona central de Chile; el segundo es el análisis de la vulnerabilidad sísmica de un canal de riego localizado en un valle costero del centro-sur de Chile.

### Análisis del sistema

El primer paso para el análisis de un sistema es su definición. En general, la definición de un sistema debe considerar la identificación del sistema y de sus fronteras. Además, es necesario conocer sus componentes o elementos y las interrelaciones entre ellos. Después de la definición, y de acuerdo con los objetivos del estudio y de las características del sistema, es posible hacer una representación del sistema usando una estructura de elementos en serie y paralelo. Esta representación permite entender cómo los elementos conforman el sistema y entregar una imagen directa que incluso permite evaluar problemas simples. Como ejemplo de esto último se puede usar esta representación para evaluar la condición de una estructura hidráulica en un canal de riego.

Para el estudio de la evaluación de la respuesta de un sistema después de que ha ocurrido un evento, la metodología a utilizar es el árbol de análisis para ese evento. Este análisis empieza con un evento definido como inicial, que normalmente es una situación que interesa controlar. Después del evento inicial, cada componente del sistema tiene un posible estado de éxito o de falla. Partiendo con el evento inicial y siguiendo las posibles consecuencias, es posible definir los posibles escenarios de fallas o accidentes causados por el evento inicial (Weihing y Eisenhauer, 1991).

### Evaluación del sistema

Dependiendo de las características del sistema a evaluar y de los objetivos de la investigación, hay muchas formas posibles de evaluar un mismo sistema. Por esa razón, el principal punto de todo proceso de evaluación es saber qué se va a evaluar y por qué.

Esta metodología está centrada en la evaluación de estructuras hidráulicas utilizadas para riego. En esta área, los aspectos a evaluar son frecuentemente cualitativos. Como ejemplo se puede tomar el caso de un sistema de fertirrigación, donde no se conoce con precisión cómo se está aplicando el químico y sólo se tiene una idea de la forma en que van a actuar los componentes del sistema si se produce un flujo inverso. En este tipo de situaciones, el uso de números difusos entrega un interesante enfoque para obtener una evaluación general del problema. Cada elemento del sistema puede ser evaluado utilizando una escala cualitativa asociada con un número difuso. Después de eso es

posible determinar el valor cualitativo del sistema usando el álgebra de los números difusos.

### Definición de números difusos

Se define como confiabilidad de un elemento a la posibilidad de que este elemento trabaje en forma adecuada después de la ocurrencia del evento inicial. Usando esta definición, para cada elemento o componente del sistema se puede evaluar su confiabilidad usando una escala cualitativa definida de acuerdo con los siguientes índices:

Muy alta - Alta - Media - Baja - Muy baja

Si el valor de falla absoluta es definido como 0.00 y el valor de éxito absoluto es definido como 1.00, entonces es posible asignar un número difuso triangular para cada uno de esos valores. Esta asignación se muestra en el cuadro 1. El valor punta dependerá del juicio del evaluador, basado en la particular condición de cada elemento. Por ejemplo, si un elemento tiene una condición muy buena y un alto índice de éxito, su valor punta puede ser 0.78.

### Aplicación de la metodología

#### Fertirrigación

La fertirrigación es una práctica agrícola que consiste en la aplicación de fertilizante a las plantas a través del sistema de irrigación. En general, la fertirrigación se considera una práctica ambiental económicamente eficiente. Entre sus principales ventajas está el ahorro de fertilizante y de energía, así como la reducción de efectos como la compactación del suelo, peligros para el operador y daños a los cultivos (Weihsing y Eisenhower, 1991). Sin embargo, esta técnica también presenta desventajas, como el hecho de que se pueda necesitar el fertilizante cuando no se requiera de riego; problemas de uniformidad en la aplicación del químico asociados con condiciones adversas en la aplicación del riego (por ejemplo viento), y el potencial riesgo de contaminación accidental de la fuente de suministro de agua para el sistema de riego (Soil Conservation Service, 1993).

La metodología que se presenta en este documento puede utilizarse para evaluar la posibilidad de una contaminación accidental por un químico de la fuente de suministro de agua para un sistema de fertirrigación. Este tipo de accidente puede ocurrir cuando se da la siguiente secuencia de eventos:

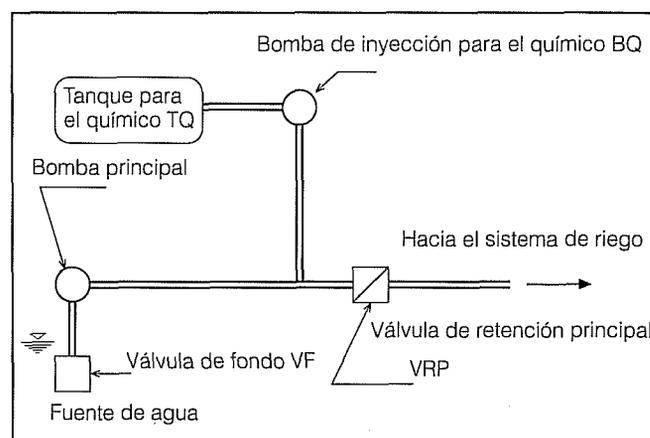
**Cuadro 1. Asignación de números difusos a la escala cualitativa.**

| Confiabilidad | Mínimo | Máximo |
|---------------|--------|--------|
| Muy alta      | 0.8    | 1.0    |
| Alta          | 0.6    | 0.8    |
| Media         | 0.4    | 0.6    |
| Baja          | 0.2    | 0.4    |
| Muy baja      | 0.0    | 0.2    |

1. Una inesperada falla mecánica o eléctrica causa una detención brusca de la bomba.
2. La detención causa un golpe de ariete en el sistema, con la consecuente inversión del flujo.
3. Al menos uno de los componentes del sistema falla, permitiendo que la mezcla de agua y químico fluya hacia la fuente de suministro de agua.

El diseño utilizado para el ejemplo corresponde a un sistema de fertirrigación diseñado para una plantación de frutales en el Valle Central de Chile. El sistema está compuesto por la bomba principal, que eleva el agua desde la fuente hasta el sistema de riego. El químico es inyectado al sistema de riego, desde un estanque, mediante una bomba de inyección. El sistema incluye una válvula de retención en la línea principal y una válvula de retención de fondo, dentro de la fuente de suministro de agua. Las conexiones de este sistema se muestran en la ilustración 2. Para efectos del análisis, las fronteras del sistema son una sección de la línea principal después de la conexión del subsistema de inyección de químico y la fuente de suministro de agua para riego (canal o pozo).

**Ilustración 2. Esquema del sistema de fertirrigación.**



**Cuadro 2. Análisis de las fallas posibles para cada elemento del sistema.**

| Elemento                                       | Falla  |
|--|--|
| Bomba principal (BP)                           | Por definición del accidente, la bomba debe detenerse en forma brusca. |
| Válvula de retención principal (VRP)           | Abertura y rotura  |
| Válvula de fondo (VFI)                         | Abertura y rotura  |
| Válvula de fondo después de falla de VRP (VFd) | Abertura y rotura  |
| Bomba de inyección para el químico (BQ)        | Continúa en operación  |
| Tanque del químico                             | Derrame de químico   |

Los elementos que conforman el sistema pueden fallar de más de una manera. Estos problemas pueden ser independientes o con una fuerte dependencia con el defecto de otro elemento. Debido a esto, el análisis de las fallas posibles para cada elemento es necesario (cuadro 2). Además, este análisis permite la simplificación del sistema, ya que si los problemas de un elemento no influyen en la ocurrencia del accidente en estudio, este elemento puede eliminarse del análisis.

Para cada elemento considerado en el análisis y para cada tipo de falla posible se puede asignar un NDT que represente la confiabilidad del elemento después de una inversión de flujo causada por la repentina detención de la bomba principal. Esta asignación se realiza según la metodología discutida en la sección "Evaluación del sistema", y es subjetiva, por lo que el conocimiento y la experiencia del evaluador juegan un importante papel. Para cada elemento se calcula su índice de confiabilidad usando la siguiente expresión:

Sea:

$A_{i,j}$  = NDT, índice de confiabilidad para el tipo de falla  $j$  del elemento  $i$ .

Entonces:

$$A_i = \prod_j A_{i,j}$$

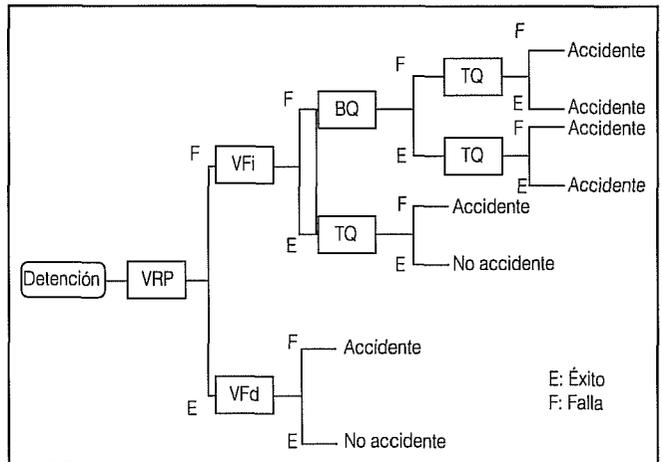
Los valores del índice de confiabilidad para cada tipo de falla y para cada elemento se presentan en el cuadro 3. Con los datos del cuadro 3 es posible la construcción del árbol de análisis para una detención brusca del sistema y una inversión del flujo (ilustración 3).

Existen seis posibles combinaciones que pueden causar un accidente:

**Cuadro 3. Índice de confiabilidad para cada elemento.**

| Elemento | Falla    | Confiabilidad | $A_{i,j}$     | $A_{i,}$         |
|----------|----------|---------------|---------------|------------------|
| VRP      | Abierto: | Muy alto      | 0.8, 0.9, 1.0 | 0.48, 0.63, 0.80 |
|          | Rota:    | Alto          | 0.6, 0.7, 0.8 |                  |
| Vfi      | Abierto: | Alto          | 0.6, 0.7, 0.8 | 0.36, 0.49, 0.64 |
|          | Rota:    | Alto          | 0.6, 0.7, 0.8 |                  |
| VFd      | Abierto: | Alto          | 0.6, 0.7, 0.8 | 0.12, 0.21, 0.32 |
|          | Rota:    | Bajo          | 0.2, 0.3, 0.4 |                  |
| BQ       | Falla:   | Muy alto      | 0.8, 0.9, 1.0 | 0.80, 0.90, 1.00 |
| TQ       | Derrame: | Alto          | 0.6, 0.7, 0.8 | 0.60, 0.70, 0.80 |

**Ilustración 3. Árbol de análisis para una detención brusca del sistema de bombeo con una inversión del flujo.**



1. Falla de la válvula principal seguida por la falla de la válvula de fondo, la falla de la bomba de inyección del químico y el derrame de químico desde el tanque. Este es el peor escenario.

2. Falla de la válvula principal seguida por la falla tanto de la válvula de fondo como de la bomba de inyección del químico.
3. Falla de la válvula principal seguida por la falla de la válvula de fondo y el derrame de químico desde el tanque.
4. Falla de la válvula principal seguida por la falla de la válvula de fondo.
5. Falla de la válvula principal seguida del derrame de químico desde el tanque.
6. Falla sólo de la válvula de fondo.

El índice de confiabilidad para cada combinación es:

$$C_k = \prod_i A_i$$

La confiabilidad para el accidente es:

$$S_t = \left[ 1 - \prod_k (1 - C_k) \right]$$

Los resultados se muestran en el cuadro 4.

En la ilustración 4 es posible apreciar la importancia crítica que tiene la válvula de retención ubicada en la línea principal. Esta observación es relevante, porque en muchos diseños de sistemas pequeños se omite la instalación de esta válvula cuando la sobrepresión causada por un golpe de ariete se considera pequeña.

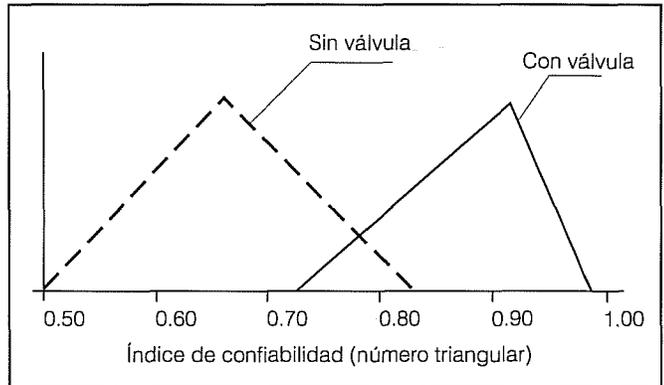
#### Riesgo sísmico de un canal de riego

Un segundo ejemplo de la aplicación de esta metodología se presenta a través de la evaluación del riesgo de que un canal de riego colapse después de un sismo moderado. Como es bien sabido, Chile es un país altamente sísmico. Por esta razón, al analizar sistemas

**Cuadro 4. Evaluación de la confiabilidad para el sistema.**

| Combinación               | Índice           |
|---------------------------|------------------|
| 1                         | 0.08, 0.19, 0.41 |
| 2                         | 0.14, 0.28, 0.51 |
| 3                         | 0.10, 0.22, 0.41 |
| 4                         | 0.17, 0.31, 0.51 |
| 5                         | 0.29, 0.44, 0.64 |
| 6                         | 0.36, 0.49, 0.64 |
| Confiabilidad del sistema | 0.73, 0.91, 0.99 |

**Ilustración 4. Importancia de la válvula de retención ubicada en la línea principal.**



de conducción de aguas es recomendable incorporar un análisis de vulnerabilidad al riesgo de temblores. En este caso, el evento inicial corresponde a un sismo de intensidad VIII en la escala modificada de Mercalli.

El caso de estudio corresponde al canal de riego Cayucupil, ubicado en la provincia de Arauco, VIII Región de Chile. El canal tiene una capacidad de conducción máxima de dos metros cúbicos por segundo y una longitud de 29 kilómetros.

El canal Cayucupil fue estudiado por un equipo de la Universidad de Concepción en 1993, como parte de un proyecto integral de evaluación del riego en la zona de Arauco. Debido a que gran parte del canal es nuevo, las estructuras hidráulicas se encuentran en un buen estado, sin embargo se detectaron ciertos puntos donde se presenta un riesgo significativo de colapso después de un sismo. Estos puntos se indican en el cuadro 5.

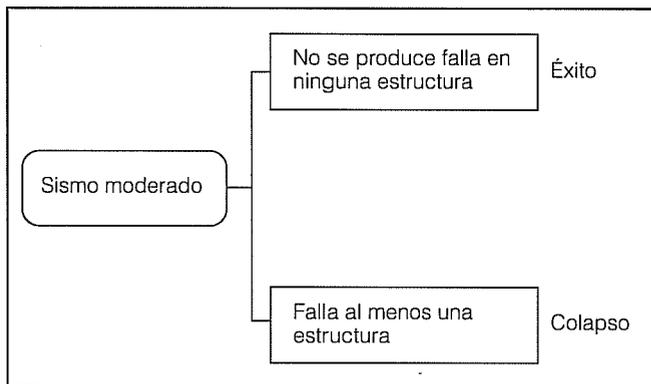
Usando la asignación de números difusos mostrada en el cuadro 3, se asignó un NDT que representa la confiabilidad de que en cada uno de estos puntos la estructura resista el sismo. En general, la bocatoma y el cruce del estero son estructuras en muy buen estado. La zona del kilómetro 10.6 presenta una confiabilidad baja debido a la posibilidad de colapso del terraplén que soporta el canal. Pese a que los sifones se encuentran en buen estado, su confiabilidad es media, ya que este tipo de estructuras es más vulnerable frente a un sismo.

Desde el punto de vista sísmico, se puede considerar que un canal de riego es un sistema lineal formado por una serie de elementos conectados en serie. La falla de cualquiera de estos elementos produce el colapso del canal. Esto quiere decir que sólo el éxito simultáneo de todas las estructuras asegura que el sistema no colapsará. De acuerdo con lo anterior, el árbol de

**Cuadro 5. Puntos críticos detectados en el canal Cayucupil.**

| Kilómetro | Tipo de estructura                           | Índice de confiabilidad |      |      |
|-----------|--|-------------------------|------|------|
|           |  | n1                      | n2   | n3   |
| 0.000     | Bocatoma de hormigón armado en buen estado   | 0.80                    | 0.95 | 1.00 |
| 2.000     | Cruce estero en buen estado                  | 0.80                    | 0.90 | 1.00 |
| 10.600    | Amenaza de derrumbe y colapso de terraplenes | 0.20                    | 0.30 | 0.40 |
| 14.250    | Sifón, en buen estado                        | 0.40                    | 0.50 | 0.60 |
| 22.940    | Sifón, en buen estado                        | 0.40                    | 0.50 | 0.60 |
|           | Confiabilidad del canal después de un sismo  | 0.02                    | 0.06 | 0.14 |

**Ilustración 5. Árbol de análisis para el caso del colapso de un canal de riego después de un sismo moderado.**



análisis se puede expresar de la forma simplificada indicada en la ilustración 5.

Del análisis se concluye que el canal Cayucupil posee una baja confiabilidad frente a un temblor moderado. Lo anterior se debe principalmente a la existencia de una zona con un terraplén inestable y a la existencia de dos sifones.

### Conclusiones

La metodología usada para esta evaluación combina las ventajas de dos técnicas:

1. Un árbol de análisis para un evento que permite la interpretación y entendimiento del sistema en estudio. Además, con esta técnica es posible identificar qué elementos del sistema son más importantes y dónde se deben centrar las acciones preventivas.
2. El uso de números difusos para la evaluación de la confiabilidad del sistema permite la evaluación de parámetros imprecisos y la incorporación de la experiencia y conocimiento del evaluador.

Esta metodología es adecuada para evaluar diferentes tipos de riesgo asociados con sistemas y estructuras de riego. Además, la incorporación de este tipo de análisis al estudio de diseño o transformación de sistemas de riego permite tener una mayor claridad de qué puede pasar si las condiciones de diseño son sobrepasadas.

### Agradecimientos

La realización de este trabajo fue posible gracias al financiamiento otorgado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción, Chile. Proyecto DIUC 94.133.003-1.1.

Recibido: 13/10/1999

Aprobado: 8/05/2000

### Referencias

- Boykin, R.F., M. Kazarians y B.J. Garrick. "Apply Risk Analysis to Identify and Quantify Plant Hazards", *InTech*, vol. 32, núm. 2, julio de 1986, pp. 49-52.
- Dubois, D. y H. Prade, "Operation on Fuzzy Numbers", *Int. J. Systems SCI*, vol. 9, núm. 6, 1978, pp. 613-626.
- Fedrizzi, M., J. Kacprzyk y M. Roubens, *Interactive Fuzzy Optimization*, Springer-Verlag, Berlín-Nueva York, 1991, 216 pp.
- Gui, X.Q. y C.E. Goering, "Introduction to Fuzzy Set Theory and Applications", *Transactions in Agriculture*, American Society of Agricultural Engineers, vol. 33, núm. 1, enero-febrero de 1990, pp. 306-313.
- Kaufmann, A., y M. Gupta, *Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications*, Van Nostrand Reinhold Co., Nueva York, 1991, 361 pp.
- Soil Conservation Service (S.C.S), *National Engineering Handbook*, capítulo 2, U.S. Department of Agriculture, septiembre de 1993, 120 pp.

Tanaka, H., L.T. Fan, F.S. Lai y K. Toguchi, "Fault Tree Analysis by Fuzzy Probability", *IEEE Transaction of Reliability*, vol. 32, núm. 5, diciembre de 1983.

Weihing, W.J. y D.E. Eisenhauer, "Methodology for Risk Analysis of Chemigation", *Transactions of the ASAE*, vol. 34, núm. 5, 1991, pp. 2021-2030.

#### Abstract

Arumí, J.L. & D. Jones, "Methodology for Risk Analysis of Irrigation Structures", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVI, num. 3, pages 67-74, July-September, 2001.

During their operational life, irrigation structures are exposed to damage resulting from floods, earthquakes or just wrong management. Some failures may result in accidents that may pollute irrigation water sources. Thus, risk analysis must be part of the design and evaluation of irrigation structures. This paper presents a methodology for risk analysis that integrates two different techniques: Event tree analysis for the study of the system and the use of fuzzy numbers for the management of uncertainty. The combination of both techniques produces a simple methodology that can be used as a complement for the design or evaluation of irrigation structures and systems. The risk analysis of a chemi-irrigation system after a failure of the pumping system is used to illustrate the methodology here presented. The analysis shows that the retention valve plays a very important role to prevent chemical spills into the water source. An additional example presents seismic risk analysis of an irrigation channel after being hit by an earthquake grade VIII in Mercalli's scale.

**Key words:** irrigation structures, chemi-irrigation, risk analysis, fuzzy numbers.

#### Dirección institucional de los autores:

*José Luis Arumí R.*

Universidad de Concepción  
Departamento de Riego y Drenaje  
Vicente Méndez 595, Chillan, Chile  
Teléfono: (56 42) 208 804  
Fax: (56 42) 275303  
Correo electrónico: jarumi@udec.cl

*David Jones*

University of Nebraska-Lincoln  
Department of Biological Systems Engineering  
212 L.W. Chase Hall Lincoln, NE 68583-0726, USA  
Teléfono: (1 402) 472 6716  
Fax: (1 402) 472 6338  
Correo electrónico: djones@unlinfo.unl.edu