

OBRAS HIDRÁULICAS

En las estructuras hidráulicas los causados por inundaciones, especialmente mal manejo. Por esta razón el análisis de riesgo debe ser considerado en la evaluación de las estructuras o sistemas hidráulicos. Se presenta una metodología para el análisis de riesgo que combina dos técnicas: el árbol de análisis para el estudio del sistema y el uso de la teoría de los números pequeños para el manejo de la incertidumbre. La combinación de ambas técnicas produce una metodología que puede ser utilizada como complemento para el diseño y evaluación de obras de riesgo. En la aplicación de la metodología se presenta el análisis del riesgo de contaminación de un sistema de fertirrigación después de sufrir una detención brusca de la corriente de energía. El análisis demuestra que la válvula de retención, utilizada para el arriete, tiene un papel muy importante en disminuir el riesgo de contaminar los cultivos en la fuente de suministro de agua.

Ph.D., Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chile
337 Chulfan, Chile. E-mail: jarumi@udec.cl

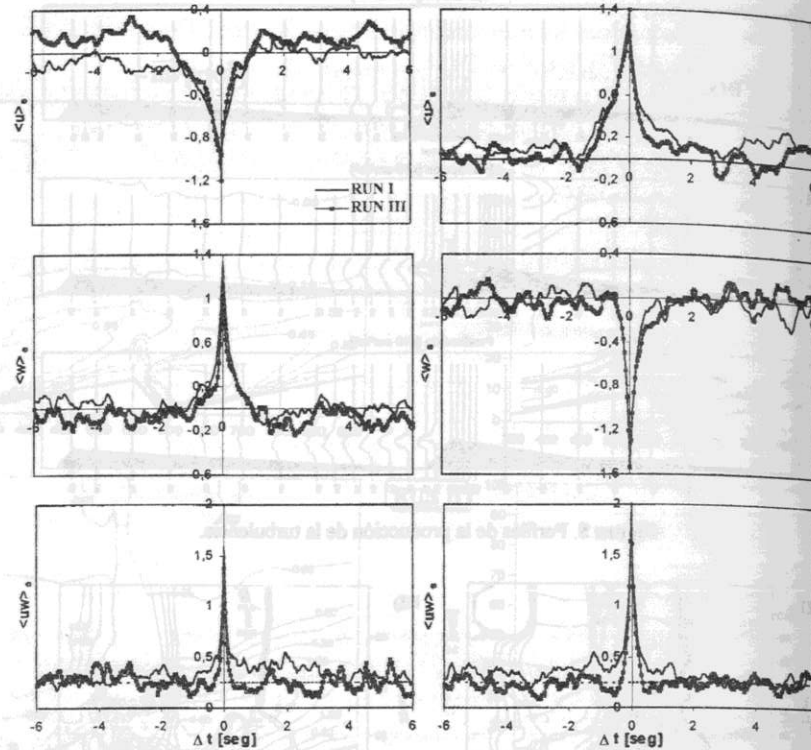


Figura 8. Correlaciones para los eventos de eyección y de barrido en el punto $x = 842\text{mm}$, $y = 4\text{mm}$ para RUN I y RUN III.

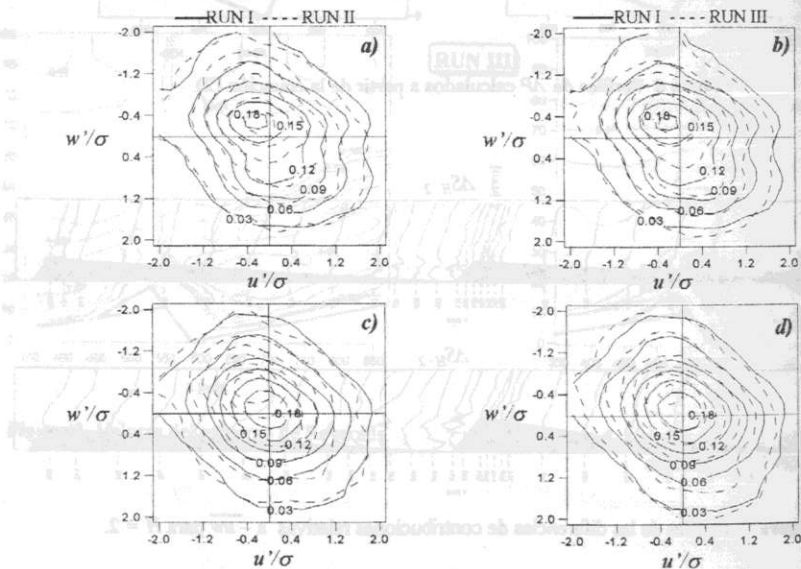


Figura 9. Función de densidad de probabilidad conjunta en la cara de aguas arriba del rizo siguiente. - a) y b) sobre la cresta del rizo, a 4mm del fondo local; c) y d) para el perfil anterior a la cresta, $y = 4\text{mm}$.

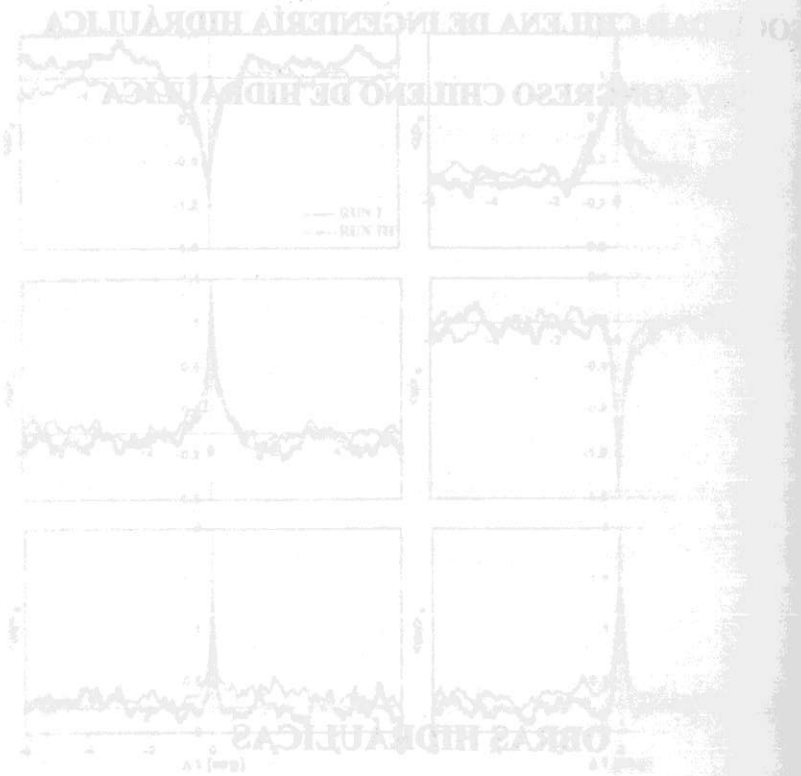


Figura 8. Correlaciones para los eventos de eyección y de barrido en el fondo local. $y = 4mm$ para RUN I y RUN III.

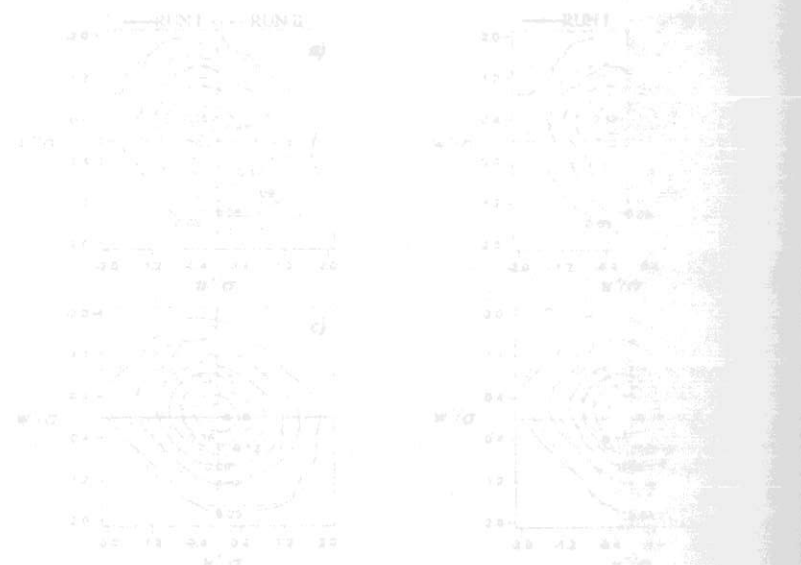


Figura 9. Función de densidad de probabilidad conjunta en la cara de aguas arriba sobre la cresta del rizo a 4mm del fondo local. c) y d) para el perfil...

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO EN ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS

JOSE LUIS ARUMI R.¹

RESUMEN

Durante su vida útil, las estructuras hidráulicas están expuestas a daños causados por inundaciones, terremotos o simplemente mal manejo. Por esta razón el análisis de riesgo debe ser considerado dentro del diseño y la evaluación de las estructuras o sistemas hidráulicos.

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 evaluación de estructuras y sistemas de riego.

Como ejemplo de aplicación de la metodología se presenta el análisis del riesgo de contaminación accidental asociado a un sistema de ferti-irrigación después de sufrir una detención brusca de la bomba debido a un corte de energía. El análisis demuestra que la válvula de retención, utilizada para prevenir golpe de ariete, tiene un papel muy importante en disminuir el riesgo de derrames accidentales de químicos en la fuente de suministro de agua.

¹Ingeniero Civil Ph.D., Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Campus Chillán, Casilla 537 Chillan, Chile. E-mail: jarumi@udec.cl

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, nuevos mercados para los productos agrícolas chilenos se abrieron tanto en Europa como en Norte América, 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; Sin embargo, muchas veces no disponen de los recursos para adquirir nuevos sistemas. 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 ningún control sobre la operación de sus equipos y sistemas de riego.

El Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad de Concepción 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, estas son el uso de árbol de análisis para un evento y el uso de números difusos.

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 todas 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 un terremoto, una inundación, sabotaje o simplemente mal manejo.

Cuando el riesgo se origina en un evento imprevisto como un terremoto o una inundación, esta Situación se 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 (Weihing 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 ser tomado en cuenta. Para esto, un criterio tradicional ha sido el sobredimensionamiento de los diseños. No obstante que este criterio 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 que es disponible actualmente permite obtener y manejar la información en forma más fácil, lo cual ha posibilitado el desarrollo de nuevos métodos para el manejo de la incerteza 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 dispone sobre el problema en estudio. La teoría de los conjuntos difusos (fuzzy set theory) es definida 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.

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

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

Esta función define un conjunto difuso caracterizado por los valores a_1 , a_2 y a_3 . Este conjunto difuso, ilustrado en la figura 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 mas posible que puede tomar el conjunto. Este último valor se denomina valor punta.

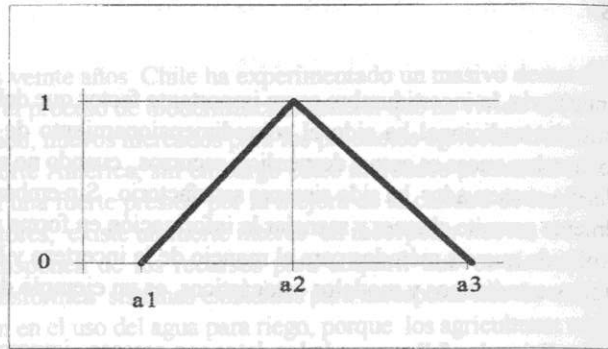


Figura 1, Número difuso triangular $NDT(a_1, a_2, a_3)$.

El álgebra de los números difusos permite el uso de esta teoría de los números difusos para la solución de problemas complejos que involucran elementos interrelacionados. 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) presenta 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:

$$A = NDT(a_1, a_2, a_3) \text{ y } B = NDT(b_1, b_2, b_3).$$

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

$$A \cdot B = (a_1 \cdot b_1, a_2 \cdot b_2, a_3 \cdot b_3) \quad (2)$$

$$1 - A = (1 - a_1, 1 - a_2, 1 - a_3) \quad (3)$$

METODOLOGÍA

Esta metodología fue creada para la evaluación cualitativa del riesgo asociado a estructuras y sistemas de riego. En general la metodología puede ser usada para la evaluación del riesgo de destrucción de una estructura causado por un sismo o una inundación. También se puede utilizar esta metodología para evaluar el riesgo de deterioro de un sistema causado por mal manejo o una decisión errónea. En este punto, la metodología será presentada en una forma general, para posteriormente ser usada en la evaluación del riesgo de contaminación accidental en un sistema de ferti-irrigación usado en la zona central de Chile.

a) Análisis del sistema.

El primer paso para el análisis de un sistema es la definición de este. En general la definición de un sistema debe considerar la identificación del sistema y de sus fronteras. Además, es necesario identificar sus componentes o elementos y las interrelaciones entre ellos. Después de la definición y de acuerdo a 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 como los elementos conforman el sistema y entrega una imagen directa que permite incluso 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 falla. Partiendo con el evento inicial y siguiendo las posibles consecuencias, es posible definir los posibles escenarios de fallas o accidentes producido por el evento inicial (Weihsing y Eisenhauer, 1991).

b) 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 que se va a evaluar y por que.

Esta metodología esta 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 ferti-irrigación, donde no se conoce con precisión como se esta aplicando el químico y sólo se tiene una idea de como 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.

c) 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 a 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

es posible asignar un número difuso para cada uno de esos valores. Esta asignación es mostrada en el cuadro 1.

Para el uso de números difusos triangulares, 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.

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

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología anteriormente presentada es utilizada para la evaluación de la posibilidad de contaminación accidental de la fuente de suministro de agua para un sistema de ferti-irrigación. Esta es una práctica agrícola que consiste en la aplicación de fertilizante a las plantas a través del sistema de irrigación. En general esta practica es ambiental y económicamente eficiente, pues permite un mejor control de la aplicación de fertilizante. Sin embargo, esta técnica también presenta desventajas como el hecho de que el fertilizante puede ser necesitado cuando el riego no es necesario, 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 polución accidental de la fuente de suministro de agua para el sistema de riego.

La contaminación de la fuente de suministro de agua puede ocurrir si ocurre un accidente con la siguiente secuencia de eventos:

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 analizado corresponde a un sistema de ferti-irrigación diseñado para una plantación de frutales en el Valle Central de Chile. El sistema esta 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 son mostradas en la figura 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).

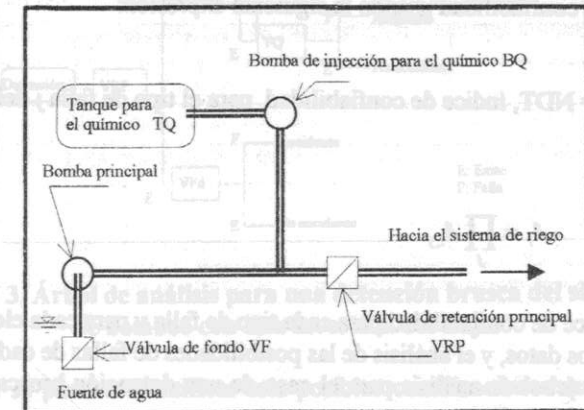


Figura 2. Esquema del sistema de ferti-irrigación

Los elementos que conforman el sistema pueden fallar de mas de una manera. Estas fallas pueden ser independientes o con una fuerte dependencia con la falla de otro elemento. Debido a esto es necesario analizar las fallas posibles para cada elemento (cuadro 2). Este análisis permite la simplificación del sistema, ya que si la falla de un elemento no influye en la ocurrencia del accidente en estudio, este elemento puede ser eliminado del análisis.

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

Elemento	Falla
Bomba principal (BP)	La bomba debe detenerse en forma brusca.
Válvula de retención principal (VRP)	Abierta o rota
Válvula de fondo (VFi)	Abierta o rota
Válvula de fondo después de falla de VRP (vfd)	La posibilidad de falla es mayor.
Bomba de inyección para el químico (BQ)	Continua en operación
Tanque del químico	Derrame de químico

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 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:

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

Entonces:

$$A_i = \prod_j A_{i,j} \quad (4)$$

Confiabilidad	Mínimo	Máximo
Muy alta	0.8	1.0
Alta	0.6	0.8
Media	0.4	0.6

Los valores del índice de confiabilidad para cada tipo de falla y para cada elemento se presentan en el cuadro 3. Con esos datos, y el análisis de las posibilidades de fallas de cada elemento, es posible la construcción del árbol de análisis para el caso de una detención brusca del sistema con una inversión del flujo (figura 3).

Cuadro 3, Índice de confiabilidad para cada elemento.

Elemento	Falla	Confiabilidad	A_{ij}	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

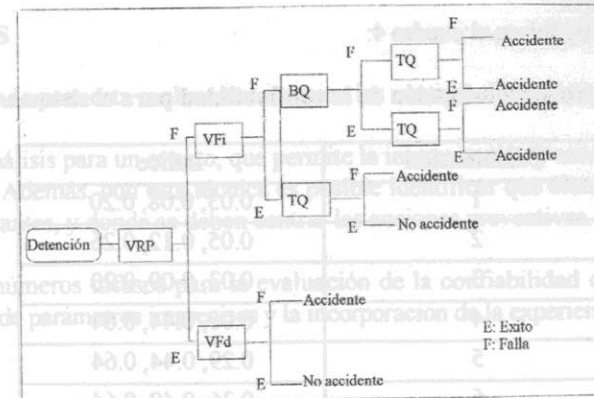


Figura 3, Árbol de análisis para una detención brusca del sistema de bombeo con una inversión del flujo.

Del árbol de análisis se pueden identificar seis posibles combinaciones que pueden causar un accidente:

1. Falla de la válvula principal seguida por la falla de la válvula de fondo, 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 de la válvula de fondo, 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 el derrame de químico desde el tanque.
6. Falla sólo de la válvula de fondo

El índice de confiabilidad para cada combinación es:

$$C_k = \prod_i A_i \quad (5)$$

La confiabilidad para el sistema es:

$$S_r = \left[1 - \prod_k (1 - C_k) \right] \quad (6)$$

Los resultados son mostrados en el cuadro 4:

Cuadro 4, Evaluación de la confiabilidad para el sistema.

Combinación	Indice
1	0.03, 0.08, 0.20
2	0.05, 0.12, 0.26
3	0.03, 0.09, 0.20
4	0.06, 0.44, 0.64
5	0.29, 0.44, 0.64
6	0.36, 0.49, 0.64
Confiabilidad del sistema	0.62, 0.82, 0.95

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

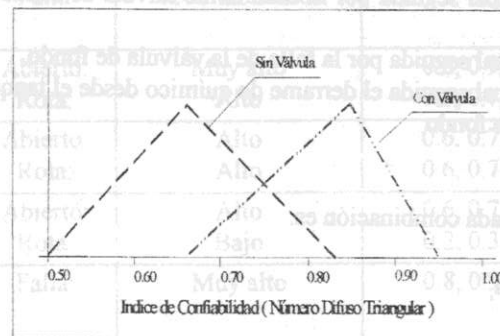


Figura 4, Importancia de la válvula de retención ubicada en la línea principal.

CONCLUSIONES

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

- i. Arbol de análisis para un evento, que permite la interpretación y entendimiento del sistema en estudio. Además, con esta técnica es posible identificar que elementos del sistema son más importantes, y donde se deben centrar las acciones preventivas.
- ii. 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 la evaluación de diferentes tipos de riesgo asociado a sistemas y estructuras de riego. Además la incorporación de este tipo de análisis al estudio de diseño o transformación de sistemas de riego, pues permite tener una mayor claridad de que puede pasar si las condiciones de diseño son sobrepasadas.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

1. Boykin R. F., M. Kazarians and B. J. Garrick. 1986. "Apply Risk Analysis to Identify and Quantify Plant Hazards." InTech (July):49-52
2. Dubois D, and Prade, H. 1978. "Operation on Fuzzy Numbers". Int. J. Systems SCI., 1978, Vol. 9, no 6, pages 613-626
3. Fedrizzi M., J. Kacprzyk and M. Roubens. 1991. "Interactive Fuzzy Optimization." Berlin, New York: Springer-Verlag. 1991. 216 p.
4. Gui X.Q. and Goering C.E., 1990. "Introduction to Fuzzy Set Theory and Applications". American Society of Agricultural Engineers. Transactions in Agriculture, pages 306-313, vol. 33(1) January - February 1990.
5. Kaufmann A., and M. Gupta. 1991. "Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications." Van Nostrand Reinhold Co. New York. 1991. 361 p.
6. Soil Conservation Service (S.C.S), 1993. "National Engineering Handbook", Chapter 2. U.S. Dept. Of Agriculture. September 1993.
7. Tanaka, H., Fan L.T., Lai, F.S. and Toguchi, K., 1983. "Fault Tree Analysis by Fuzzy Probability." IEEE Transaction of reliability, vol r-32, No 5, December 1983.
8. Weihing W.J. and Eisenhauer D.E., 1991. "Methodology for Risk Analysis of Chemigation". Transactions of the ASAE (Vol. 34, No 5, pp. 2021-2030, 1991).