

# Plataforma Modular Integrada para el pronóstico de inundaciones

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la vida. El uso del agua aumentó a un ritmo dos veces más veloz que el aumento de la población durante el pasado siglo veinte. Muchos países no están exentos de confrontar problemas con el agua que se necesita para las necesidades vitales del ser humano y para el desarrollo agrícola e industrial.

No obstante lo anterior el agua en exceso genera destrucción y muerte. El gran escurrimiento provocado por intensas lluvias, provenientes de ciclones o monzones o simplemente por aquellas que caen en el período lluvioso en países tropicales, destruye bienes materiales, destruye la flora y la fauna y lo que es peor aún, cobra vidas humanas. Ejemplos muy recientes en nuestra región del Caribe lo constituyen los impactos de los huracanes Gustav e Ike que azotaron fuertemente en el mes de Septiembre.

La prevención temprana de estos fenómenos atmosféricos y la predicción en tiempo de las áreas que se afectarán es un reto permanente que tiene el hombre. En Cuba los sistemas de alerta temprana, la red de radares del Instituto de Meteorología y la organización de todo el pueblo bajo el mando de los Consejos de Defensa y de la Defensa Civil hacen que las pérdidas sean mucho menores que en otros países del área que no cuentan con esta organización. Para lograrlo, año tras año hay que invertir muchos recursos en la preservación de bienes y vidas.

A partir del surgimiento y desarrollo de las nuevas tecnologías relativas al monitoreo, control y supervisión de procesos se abren nuevas posibilidades del uso integrado de simuladores de procesos empleando PC, recolectores y transmisores de datos y el empleo de los Sistemas de Información Geográfico como procesador de los datos del entorno geográfico donde se desarrolla el proceso. La electrónica, la informática, las telecomunicaciones y la

## Resumen / Abstract

*Se presenta un sistema de dirección para la toma de decisiones en el campo de la gestión de los Recursos Hidráulicos de una región con el objetivo de la prevención de inundaciones en caso de lluvias intensas, que integra la modelación matemática con la adquisición y procesamiento de información del proceso en tiempo real. Se estructura a partir de un sistema de información geográfica personalizado y actualizado con la información del área de trabajo, modelos de simulación (calibrados para las características de la región en estudio), sensores de detección de las variables de la hidráulica que intervienen en el proceso y un sistema de adquisición y procesamiento de datos.*

*Palabras clave: Integración GIS-SCADA, lluvia-escurrimiento, modelación matemática de tránsito de avenidas, pronóstico de inundaciones.*

*An integrated operation system for decision making is presented in the field of Water Resources applied to a region with the objective of flood prevention under intense rainfall. The system integrates mathematical modeling with real time information acquisition and processing. It is constructed over a personalized and updated geographical information system (GIS) containing the work area information, simulation models (calibrated for the region under study), remote sensors for hydraulic variables involved in the process and a system of data acquisition and processing (SCADA).*

*Keywords: GIS-SCADA integration, rainfall-runoff, flood routing mathematical modeling, flood forecast.*

modelación matemática constituyen la base fundamental de las tecnologías integradas que dan respuesta a los problemas de la gestión de los recursos hidráulicos y la prevención de inundaciones provocadas por intensas lluvias o ruptura de presas.

El desarrollo de equipos cada vez más robustos, versátiles y portátiles con alta escala de integración, unido al incremento significativo de las prestaciones y velocidades de cálculo de las PC, han permitido la generación de múltiples y nuevas soluciones. Muchas de las soluciones actuales proponen sistemas y métodos específicos para atender determinados procesos de los sistemas de distribución de agua (monitoreo del servicio, tratamiento y purificación de las aguas, bombeo, etc.). No obstante, hasta el presente no se aprecian tendencias claras dirigidas a la integración de soluciones que aporten un enfoque global y multifacético para el manejo del recurso agua, desde el punto de vista del conjunto de herramientas y procesos que en esta intervienen. Dentro de las soluciones técnicas conocidas se encuentran numerosas Patentes [1]-[10], métodos y herramientas informáticas para la modelación matemática y representación de la información tanto de tiempo, como espacial [11]-[14] y trabajos de reconocidos autores en este campo [15], [16].

De modo general, las soluciones patentadas conocidas proponen sistemas y métodos específicos desde el punto de vista de elementos físicos de las instalaciones, componentes electrónicos y medios de supervisión y control, lo cual reduce su campo de aplicación e impiden su generalización a los sistemas más complejos de recursos hidráulicos.

Hasta el presente no se reportan soluciones que consideren la gestión de los sistemas de recursos hidráulicos como la articulación armónica de la información que aportan los modelos, con la de tiempo real y espacial en aras de lograr parámetros óptimos en la operación, conducción, tratamiento y distribución del recurso agua.

Finalmente, de los estudios bibliográficos realizados se puede plantear que aparecen como factores que contribuyen a la inexistencia de una concepción bien establecida en la aplicación de tecnologías y herramientas:

- ◆ la asignación de funciones relacionadas a diferentes equipos de trabajo, sin la adopción de mecanismos de comunicación apropiados,
- ◆ el poco empleo de la modelación matemática para establecer las decisiones,
- ◆ la utilización de programas de aplicación de diferentes fuentes, para los cuales no están definidos los mecanismos de transferencia de información que permitan adoptar un formato único de trabajo.

El trabajo que a continuación se presenta es una propuesta de integración de componentes y los modos de actuación con éstos, que permite la prevención temprana de inundaciones provocadas por grandes lluvias y la rotura del cuerpo de las presas que embalsan agua.

## ■ BASES DE LA PMI\_PI

Las inundaciones producidas por intensas lluvias o por el rompimiento de una obra hidráulica que almacene grandes volúmenes de agua es un proceso de que se desencadena en un relativamente corto intervalo de tiempo, por tanto los sistemas de alarma deben responder a las exigencias de esta característica.

Por otra parte, los fenómenos aquí analizados son cíclicos por lo que existe una gran base de datos histórica acumulada, a veces numérica, otra veces verbal, respecto a la intensidad de ocurrencia y daños causados. Esta base de datos recopilada y procesada convenientemente es la base para la confección de los mapas de riesgo que dan criterios para las medidas de prevención que pueden y deben realizarse con mucho tiempo de antelación.

El primero de los cuatro pilares en que se apoya la Plataforma Modular Integrada para el pronóstico de inundaciones (PMI\_PI) lo constituyen los Sistemas de Información Geográficos (SIG) como herramienta digital de gestión de la geografía del área de trabajo, la simulación del proceso lluvia-escurrimiento mediante modelos hidrológicos e hidráulicos y la transmisión, procesamiento e incorporación a la base de datos de las principales variables que influyen en el proceso.

En los SIG por sus potencialidades en el procesamiento especial, se integran las variables que tienen poco o ningún cambio temporal: relieve, suelos, uso de suelos, hidrografía, geología, hidrogeología, embalses y sus obras de entrega y evacuación, red principal de drenaje y sus obras hidráulicas asociadas, otras obras hidráulicas, viales y civiles existentes, condiciones de contorno, ubicación de ciénagas y lagunas, registros históricos de laminas e intensidad de lluvia máximas, registros históricos de extracción en cada embalse y gastos conducidos por las conductoras principales, característica de los cauces naturales y artificiales por donde se drenará el agua y los niveles y características del manto freático.

El segundo pilar lo constituyen los modelos de simulación del fenómeno estudiado. La simulación se realiza en dos etapas:

- ◆ la conversión de lluvia en caudal de escurrimiento superficial y caudal de infiltración subterránea,
- ◆ el estudio de las afectaciones de este escurrimiento al trasladarse primero por el suelo y después por los cauces naturales y canales de drenaje construidos por el hombre.

Esta simulación necesita, además de la información recopilada en el SIG, una fuerte base de datos de intensidad de lluvia asociada a la información de niveles y caudales en diferentes secciones transversales de las principales vías del agua y los niveles del manto freático en toda la zona de estudio. Esta información debe recoger la historia documentada de sucesos anteriores y sumarle a esta la información que se produce, momento a momento, a partir de implantada la Plataforma.

El tercer pilar de la Plataforma lo constituye el sistema de adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos. Este sistema está constituido por sensores y transmisores de las variables que influyen en el proceso para la toma de decisiones inmediata y de sensores y recolectores de las variables que complementan la base de datos y que se emplean posteriormente para la verificación de los modelos matemáticos de simulación. Esta información se almacena en una base de datos histórica única, que se actualiza constantemente en tiempo real y en intervalos de tiempo prefijados con la información captada y almacenada en el lugar de la toma de muestra.

Precisamente, esta base de datos, capaz de almacenar y organizar de forma estructurada toda la información procesada y requerida por los sistemas antes mencionados, constituye el cuarto pilar que sustenta la PMI\_PI.

De modo que una de las fortalezas de la solución se basa en la integración armónica de los cuatro elementos que componen la plataforma de trabajo: el sistema de información geográfica personalizado para la región de estudio, modelos matemáticos del proceso que se está operando y los correspondientes modelos de optimización de las variables del sistema que se trabaja, los sensores para las variables que generan la base de datos del sistema y los registradores de información y transmisores de datos necesarios para la adquisición de la información en tiempo real y en tiempo diferido y el procesamiento en tiempo real de toda la información, empleando una base de datos única para almacenamiento e intercambio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La solución técnica tiene en cuenta las variables que se miden y la frecuencia de la medición. Las variables que se miden en tiempo real son solamente aquellas que su conocimiento generará una decisión inmediata respecto a la evacuación de bienes materiales y personas que pueden estar afectados o el restablecimiento de las condiciones normales. Las que se almacenan y descargan después de largos intervalos de tiempo en la base de datos (tiempo diferido) son aquellas que complementan la información sobre el evento extremo que ocurre.

Para la prevención de inundaciones contra intensas lluvias los parámetros a medir es la intensidad de la lluvia cada 15 minutos en tiempo real en pluviógrafos que caractericen la lluvia de las subcuencas que componen la cuenca de trabajo, los niveles cada 15 minutos en tiempo real en el cauce principal en puntos que caractericen la unión con los afluentes principales y a lo largo del recorrido de los afluentes principales en secciones donde el caudal represente el 33 por ciento, el 66 por ciento y el 100 por ciento del caudal que aporta el afluente.

Además se miden:

- ◆ los niveles en los embalses en tiempo real en puntos representativos del volumen que se almacena y de los gastos derivados por el vertedor del conjunto hidráulico,

- ◆ la intensidad de la lluvia en puntos de observación complementarios cada mes en tiempo diferido,
- ◆ los niveles en los pozos de observación principales cada 15 minutos en tiempo real,
- ◆ los niveles en los pozos de observación complementarios cada mes en tiempo diferido,
- ◆ si hay canales de drenaje se miden los niveles en secciones representativas y en las obras hidráulicas de la red cada 15 minutos en tiempo real,
- ◆ la calidad del agua en puntos de interés en tiempo diferido y en casos muy justificados por las implicaciones para la salud en tiempo real.

De igual forma se operan en tiempo real las válvulas y compuertas de regulación y control del sistema de drenaje.

La Plataforma tiene un amplio campo de aplicación ya que su actuación abarca los tres momentos decisivos en el proceso de estudio y prevención de inundaciones. Una vez implantada la Plataforma y calibrados y verificados los modelos matemáticos de simulación, la transmisión y el almacenamiento y procesamiento de datos, se establecen las siguientes formas de actuación:

- ◆ Antes del evento:

- se simulan alternativas de lluvias en la cuenca basándose en los datos históricos de intensidad, frecuencia, duración y área de afectación de la cuenca,
- se calculan a partir de los modelos de simulación en régimen impermanente los caudales y niveles de escurrimiento por el suelo, en los afluentes y en los cauces principales, los niveles en los embalses a partir de alternativas de llenado y los posibles gastos de vertimiento por la obra vertedora y sus consecuencias aguas abajo,
- se calculan las áreas de inundación como función de la variable tiempo, tanto en el proceso de crecimiento como de decrecimiento de las mismas,
- se estudian los efectos de cada tormenta de diseño supuesta y se planifican las necesarias acciones de prevención y defensa en caso de que ocurriera una tormenta semejante.

Este modo de actuación genera una amplia base de datos que servirá de guía y referencia ante futuras tormentas y permitirá pronosticar las estrategias de evacuación necesarias y prevenir pérdidas humanas y materiales.

- ◆ En el momento del evento:

- se realiza un seguimiento de la tormenta desde que se prevé su paso por el territorio controlado por la Plataforma y se estima cual de las tormentas analizadas en el modo anterior puede semejararse a la que se avecina,
- de no haber tormenta semejante, modelada anteriormente, la velocidad de respuesta de los modelos de simulación permiten, en relativo poco tiempo, diseñar un nuevo caso de estudio, representarlo y analizar su impacto en el territorio,
- una vez seleccionado el modelo que más representa

la tormenta que se avecina se analizan las medidas de prevención y defensa discutidas y aceptadas previamente y se establece la implementación de las mismas,

- a partir del paso anterior, se continúa el monitoreo de la tormenta, primero con la información recibida de otros territorios, y una vez que se afecte la cuenca donde se trabaja, con la información en tiempo real que llega a través de la red implantada de pluviógrafos y sensores,

- con la información reciente se comienza un proceso de comprobación de las medidas adoptadas sobre la base de establecer si la ocurrencia real es igual o menor de lo pronosticado o si se están superando los valores de pronóstico,

- en cada uno de los dos casos anteriores se interactúa con los modelos para establecer nuevos pronósticos de inundación y por tanto nuevas medidas de prevención y defensa.

- este proceso continúa hasta el cese total de la tormenta y el restablecimiento de las condiciones normales de los procesos hidráulicos.

Las medidas de prevención y defensa incluyen en cada caso la modelación del vertimiento por las obras vertedoras de los conjuntos hidráulicos de la cuenca y su impacto en el cauce y las áreas aguas abajo de las obras. Eso lleva en cada caso necesario a la toma de medidas respecto a la operación de los sistemas de compuertas superficiales y de fondo de las obras, una vez que se hayan determinado mediante la modelación los impactos y se hayan adoptado las medidas pertinentes para la protección de bienes y vidas.

- ◆ Después del evento,

- una vez que se regrese a la normalidad se recolecta la información de los sensores y pluviógrafos de la red de tiempo diferido y se incorporan a la base de datos, junto con los detalles finales de la tormenta ocurrida, sus efectos, medidas adoptadas y su efectividad.

- ◆ De forma sistemática

- con la información recopilada se realizan las verificaciones necesarias a los modelos de simulación, se ajustan los sistemas de transmisión y se analiza críticamente si la estructura de obtención de los datos, tanto en cantidad, como en frecuencia son suficientes en el futuro, y se adoptan nuevas medidas de ser necesario,

- se capacita a la población del territorio y a los dirigentes y técnicos empleando la información obtenida del evento ocurrido, las nuevas medidas a adoptar en el futuro y las que fueron ratificadas, una vez corroborada su efectividad.

Un resumen de las principales características que distinguen la solución que encierra esta Plataforma, se expone a continuación:

- En la solución presentada la interacción entre los elementos del sistema que describen y simulan el proceso, permite informar sobre el estado de éste en cada momento y facilita la toma de decisiones para la operación.

- La generación de ficheros de intercambios comunes para la comunicación entre el sistema de información geográfica y los modelos matemáticos.

- Interacción constante con el usuario para la información del estado del proceso y la toma de decisiones sobre el mismo de acuerdo a las restricciones preimpuestas y en consulta con los modelos de simulación y optimización del proceso.

- Autonomía de los elementos que componen la Plataforma y flexibilidad en el empleo de una u otra herramienta, lo cual la convierte en una solución universal, multifacética y poderosa, que posibilita, en caso de tormentas, tomar las decisiones más acertadas, basadas en la información histórica y la recibida con inmediatez, para reducir los riesgos de pérdidas de vidas humanas y recursos materiales ante la presencia de lluvias intensas que originen inundaciones.

El esquema de los procesos que conforman la gestión y su interconexión está representado en la figura 1.

En la misma cada sigla representa lo siguiente:

- **Base de datos histórica (BDH):** relieve, suelos, uso de suelos, hidrografía, geología, hidrogeología, embalses y sus obras de entrega y evacuación, red principal de drenaje y sus obras hidráulicas asociadas, otras obras hidráulicas, viales y civiles existentes, condiciones de contorno, ubicación de ciénagas y lagunas, registros históricos de lluvia máximas, registros históricos de extracción en cada embalse y gastos conducidos por las conductoras principales, niveles del manto freático.

- **Base de datos histórica actualizada (BDHA):** uso de suelos, obras hidráulicas, viales y civiles, cambios en la red principal de drenaje y sus obras hidráulicas asociadas, condiciones de contorno, lluvias, niveles del manto freático.

- Por embalse: nivel del embalse, gasto evacuado, variables eléctricas, alarmas.

- En la red hidrográfica y de drenaje principal: gasto, niveles en las conducciones libres, niveles en las obras hidrométricas de regulación y control, posición de válvulas y compuertas, alarmas.

- SIG: Sistema de Información Geográfica

- SCADA: Sistema de Adquisición y Control

- RDE/SE: Reglas de Evacuación de la región y Sistema de Expertos específico para la aplicación.

- STR: Supervisor de tiempo real

- Info. 1: Datos puntuales, tablas y gráficos de: niveles en embalses y puntos de la red de drenaje, niveles del manto freático, calidad del agua, gasto y variables eléctricas de cada bomba y de cada accionamiento eléctrico para válvulas y compuertas, lluvias, escurrimiento, alarmas del sistema.

- Info. 2: Mapas, tablas y gráficos de: niveles de los embalses y puntos de la red de drenaje, volúmenes extraídos y almacenados, información de cada embalse y de sus obras asociadas, información actualizada y

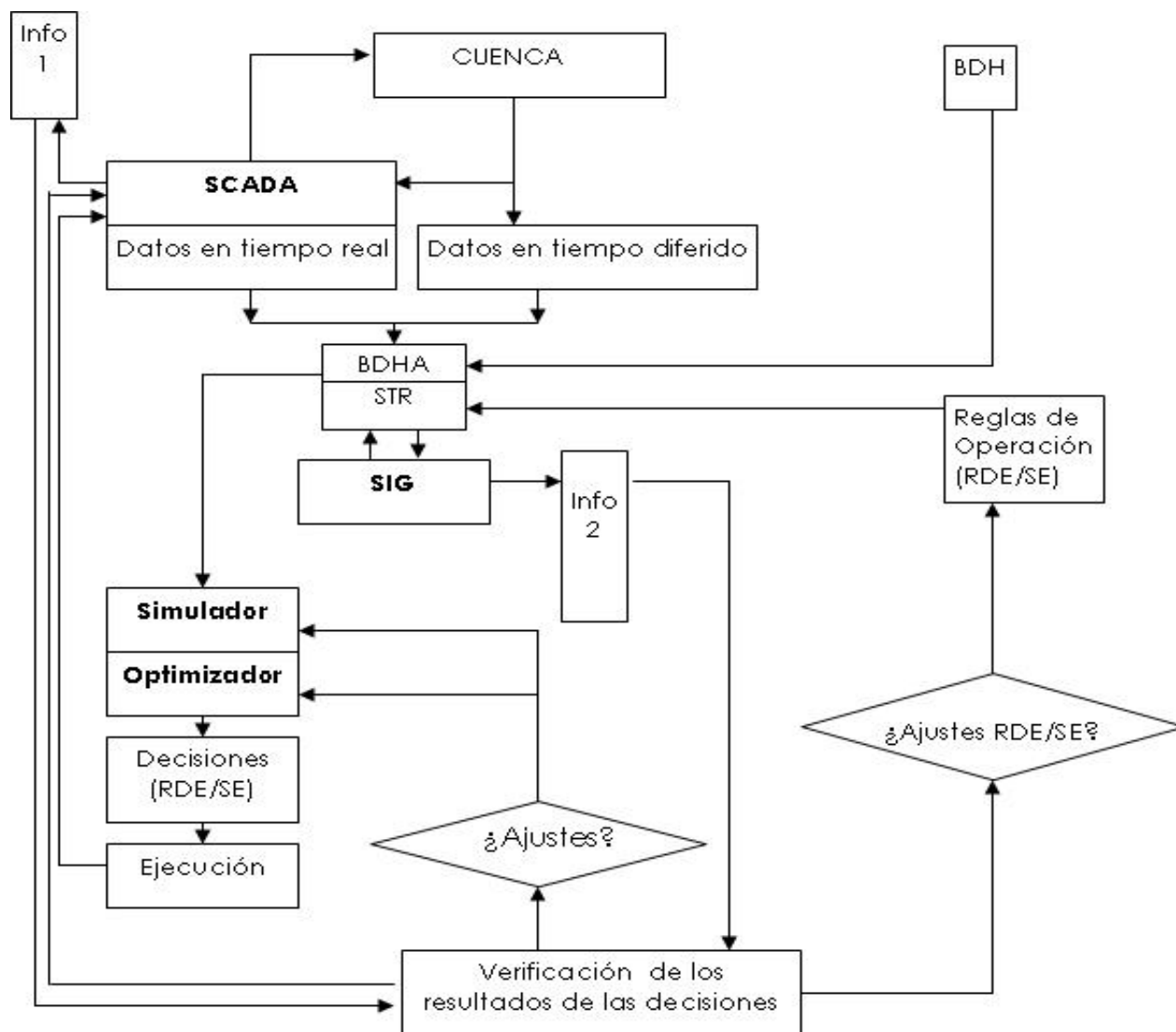


Figura 1. Esquema de los procesos de la PMI\_PI

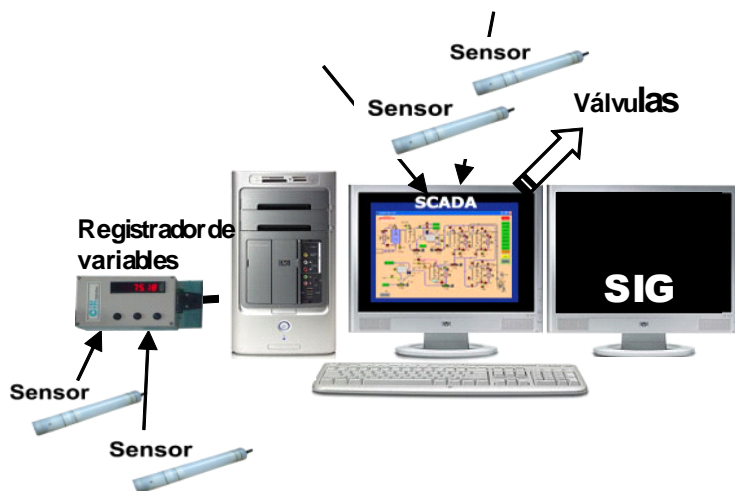


Figura 2. Esquema del equipamiento central

pronosticada respecto al tránsito de ondas de crecidas en la red de evacuación y las áreas inundadas, datos geográficos, lluvia, escurrimiento, niveles del manto freático.

A manera de ilustración un esquema de la interacción de las componentes en el centro de recepción, procesamiento y toma de decisiones, aparece en la figura 2.

## CONCLUSIONES

La Plataforma Modular Integrada para el pronóstico de inundaciones se ha aplicado hasta el momento de forma académica en la CUJAE, obteniéndose resultados altamente satisfactorios entre los que deben resaltarse: la posibilidad de personalizar cada solución de acuerdo a las exigencias del problema; la fortaleza que genera la posibilidad simultánea del uso de variables obtenidas en tiempo real y las variables obtenidas en tiempo diferido y su integración en una sola base de datos común espacio-temporal y la gran flexibilidad que da, después del análisis riguroso de posibles soluciones ante un evento extremo, poder implementarlas escalonadamente y verificarlas en tiempo real y de esta forma establecer los pronósticos de inundación y por tanto las medidas de prevención y defensa que en cada caso y cada momento sean más aconsejables.

Sin tener implementado todavía ningún algoritmo de inteligencia artificial para la toma de decisiones, los modos de actuación planteados aquí permiten tener una base de datos experta que posibilita la toma de decisiones y la retroalimentación de las mismas, tanto en tiempo real durante el evento, como después de ocurrido este.

## REFERENCIAS

[1]. Water Management System. Número de patente: PCT/US01/11915.

- [2]. System and Method for Developing a Farm Management Plan for Production Agriculture. Número de patente: PCT/US01/26051
- [3]. Water distribution amount predicting system, Número de patente: 6793806
- [4]. Water quality management system Número de patente: 6245224
- [5]. Irrigation control and management system Número de patente: 5479339
- [6]. Irrigation control and flow management system. Número de patente: 5229937
- [7]. System and Method for Optimized Control of Moving Irrigation System. Número de patente: 5,740,038
- [8]. Method of fertilizer application and field treatment. Fecha de salida de la patente: Septiembre 16, 1997. Clasificación US: 364/420
- [9]. Method and apparatus for analyzing geological data using wavelet analysis. Fecha de salida de la patente: Abril 14, 1998. Clasificación US: 364/321
- [10]. Apparatus and Method for Fusing Diverse Data. Fecha de salida de la patente: Marzo 17, 1998. Clasificación US: 364/421. Clasificación Internacional: G06F 17/17.
- [11]. HydroGeo Analyst, Waterloo Hydrogeologic Software, <http://www.waterloohydrogeologic.com>
- [12]. AquaChem, Waterloo Hydrogeologic Software, <http://www.waterloohydrogeologic.com>
- [13]. AquiferTestPro, Waterloo Hydrogeologic Software, <http://www.waterloohydrogeologic.com>
- [14]. Visual ModFlow, Waterloo Hydrogeologic Software, <http://www.waterloohydrogeologic.com>
- [15]. Shamsi, U.M. (2001). "GIS and Modeling Integration". CE News, 13(6).
- [16]. Walski, T.M. y otros (2003). Advanced Water Distribution Modeling and Management. Haestad Methods, Waterbury, CT USA.

Recibido: enero del 2009  
Aprobado: febrero del 2009