



SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA LA CIUDAD DE DURAZNO (URUGUAY)

Christian Chreties, Luis Silveira, Guillermo López, Magdalena Crisci.

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería. Universidad de la República
Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. Tel: ++598 27113386.

E-mail: chreties@fing.edu.uy, lesy@fing.edu.uy, glopez@fing.edu.uy, mcrisci@fing.edu.uy.

RESUMEN

La ciudad de Durazno (Uruguay) se ve afectada frecuentemente por inundaciones producidas por los desbordes del río Yí, las cuales producen perjuicios socioeconómicos de considerable valor a buena parte de sus pobladores. El estudio sistemático de las inundaciones en Durazno comienza en el año 2002 con la ejecución del proyecto “Plan de emergencia para la ciudad de Durazno, R. O. del Uruguay” y continúa con la actual ejecución del “Proyecto piloto de alerta temprana para la ciudad de Durazno ante las avenidas del río Yí” (PROHIMET-FJR-IMFIA). Los resultados del primer proyecto sentaron las bases para la puesta en funcionamiento del actual Sistema de Alerta Temprana (SAT) de la ciudad. Con el segundo proyecto se pretende mejorar dicho SAT de forma de optimizar el plan de acción antes, durante y después de la emergencia. En este trabajo se discuten las fortalezas y debilidades del SAT de Durazno, como medida no estructural; así como se proponen y evalúan posibles mejoras al SAT actualmente en funcionamiento. Para ello se evaluaron en tiempo real tres episodios extremos ocurridos durante 2011. Los resultados muestran que incorporando al sistema actual solamente modelación hidrológica en la cuenca alta, el pronóstico de nivel máximo mejora significativamente.

ABSTRACT

Durazno city (Uruguay) is frequently affected by Yí river floods which produce socio-economic considerable damage to many of its inhabitants. The systematic flooding study in Durazno begins in 2002 with the project “Plan de emergencia para la ciudad de Durazno, R. O. del Uruguay” and continues with the current project “Proyecto piloto de alerta temprana para la ciudad de Durazno ante las avenidas del río Yí” (PROHIMET-FJR-IMFIA). The results of the first project were crucial for the current operation of the Early Warning System (SAT) in the city. The second project aims to improve the SAT in order to optimize the operation managements before, during and after the emergency. In this paper, we discuss the strengths and weaknesses of the Durazno SAT, as non-structural measure; as well as propose and evaluate improvements to the SAT currently operation. For this purpose, three recent real-time flood events were evaluated. The results show that it is sufficient to incorporate hydrological modelling for the upper basin to obtain a significant improvement in level peak forecasting.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Durazno, capital del departamento homónimo ubicada en el centro del país (Figura 1), se ve afectada frecuentemente por inundaciones producidas por los desbordes del Río Yí, las cuales producen perjuicios socioeconómicos de considerable valor a buena parte de sus pobladores. Se trata de una ciudad de algo más de 33000 habitantes, buena parte de los cuales habita en forma consolidada el valle de inundación del río Yí, lo que se pone de manifiesto al considerar el número de personas evacuadas debido a las frecuentes inundaciones. En efecto, para la inundación acaecida en Mayo de 2007, la de mayor severidad registrada, el número de evacuados ascendió a 6000 personas, mientras que para la inundación reciente de Febrero de 2010, se registraron aproximadamente 5500 evacuados.

El estudio sistemático de la problemática de las inundaciones en la ciudad de Durazno comienza en el año 2002 con la ejecución del proyecto “Plan de emergencia para la ciudad de Durazno, República Oriental del Uruguay” (OEA-BID-CB-MTOP, 2002). En el marco de este proyecto se desarrollaron un conjunto de estudios básicos de carácter hidrológico (en particular hidrología estadística), hidráulico, socioeconómico y de ordenamiento territorial en que abarcaba la zona inundable de la ciudad. En base a ello, se analizaron diversas medidas a ser propuestas como parte del Plan de Emergencia para Durazno. Como resultados más significativos del proyecto se destacan: la obtención de curvas de inundación en la ciudad para diferentes períodos de retorno de las avenidas del río Yí; el desarrollo de un primer modelo de base estadística de alerta temprana para la ciudad; y la consecución de acciones institucionales y técnicas que permitieron años después la conformación del Centro Coordinador de Emergencias Departamental de Durazno (CECOED). Este centro coordinador si bien es dependiente del Sistema Nacional de Emergencias (SINAE) está emplazado en la ciudad de Durazno y cuenta con personal asignado para la atención de las emergencias departamentales. Estos resultados representaron una mejora muy significativa en el manejo de las emergencias de la ciudad. No obstante, diversos aspectos del plan de emergencias han requerido y aún requieren su revisión, actualización, mejora y en muchos casos la implementación de nuevas herramientas. Esto junto a la ocurrencia en los últimos años de eventos de crecida de alta recurrencia (el evento de 2007 se estima su recurrencia en 500 años y en el caso del evento de 2010 en 250 años) propiciaron la formulación y actual ejecución del proyecto: “Proyecto piloto de alerta temprana para la ciudad de Durazno ante las avenidas del río Yí”. Este proyecto de la red PROHIMET (ex - CYTED) financiado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), viene siendo ejecutado desde 2009 hasta la fecha, por el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería (UdelaR) con la co-participación del Instituto de Teoría y Urbanismo (ITU) de la Facultad de Arquitectura (UdelaR), la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA), el Sistema Nacional de Emergencias (SINAE), la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE), la Dirección Nacional de Meteorología (DNM), y el Ministerio de Ganadería agricultura y Pesca (MGAP). El principal objetivo del proyecto PROHIMET es mejorar la gestión actual de las inundaciones, a través de la mejora del sistema de alerta temprana actualmente en funcionamiento, incorporando al mismo la modelación hidrológica-hidrodinámica del sistema cuenca-río. Si bien se espera diseñar un sistema de alerta basado fuertemente en la modelación hidrológica-hidrodinámica, se mantendrá, al menos en una primera etapa, un sistema simple de alerta basado en el actual, mejorando algunos aspectos de importancia.



Figura 1.- Localización ciudad de Durazno, río Yí.

SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA ACTUALMENTE EN FUNCIONAMIENTO

La cuenca del río Yí ocupa aproximadamente 8750 Km² aguas arriba de la ciudad de Durazno. Se trata de una cuenca de baja pendiente, respuesta hidrológica lenta, con un tiempo de concentración aproximadamente de 54 horas, calculado por el método de Kirpich (Chow, 1994). El río atraviesa aguas arriba de la ciudad de Durazno, dos localidades: Polanco del Yí y Sarandí del Yí situadas a 44 y 107 Km. de la ciudad capital respectivamente (Figura 2). El tiempo de concentración de la cuenca de cabecera hasta Sarandí del Yí es de aproximadamente un día.

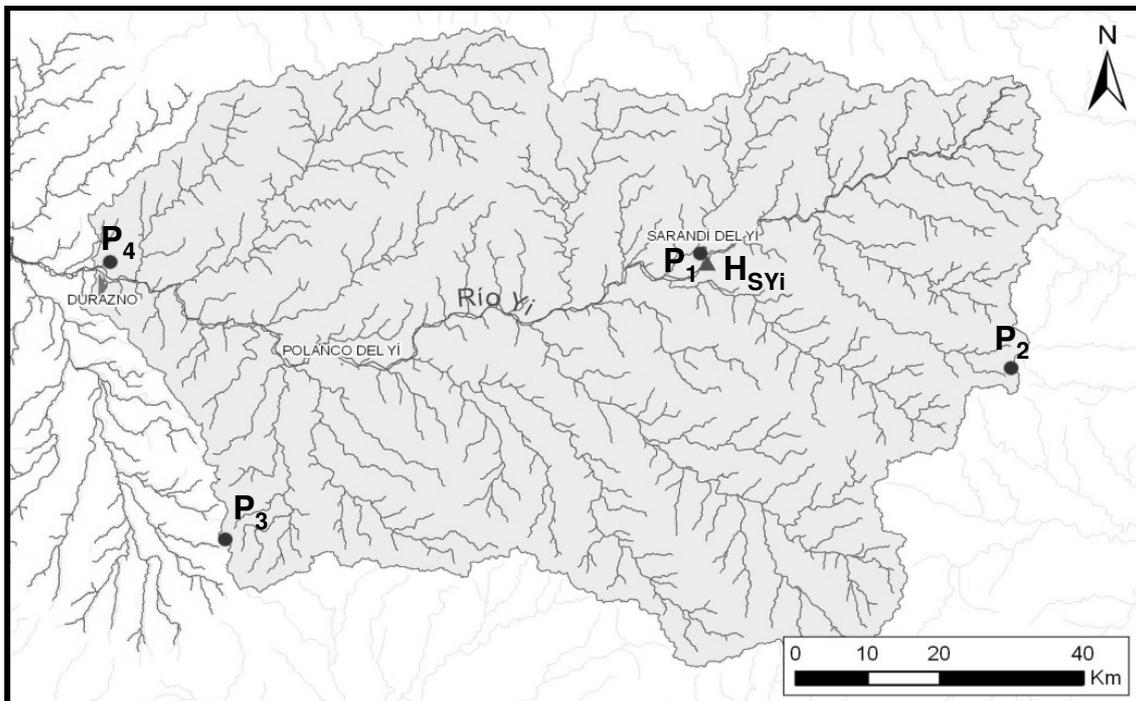


Figura 2.- Estaciones pluviométricas e hidrométricas utilizadas en el modelo estadístico desarrollado por el proyecto OEA-

El sistema de alerta desarrollado en el marco del Proyecto OEA-BID-CB-MTOP (2002) se basa en un análisis de tipo exclusivamente estadístico. Utilizando información observada de precipitación diaria en la cuenca y niveles diarios en el río Yí en las estaciones de Durazno y Sarandí del Yí, se realizó una regresión de niveles máximos-tormentas que se expresa mediante la ecuación:

$$H_D = \alpha_1 H_{SY}^{\beta_1} + \alpha_2 P_1^{\beta_2} + \alpha_3 P_2^{\beta_3} + \alpha_4 P_3^{\beta_4} + \alpha_5 P_4^{\beta_5} \quad (1)$$

siendo: H_D el nivel máximo en la ciudad de Durazno (cruce del río Yí en el Puente viejo de Ruta 5), H_{SY} el nivel máximo en Sarandí del Yí (cruce del río Yí en el Puente de la Ruta 14), P_1 hasta P_4 es el registro diario de precipitación en las estaciones pluviométricas 2215, 2266, 2395 y 2206 respectivamente. α_1 hasta α_5 y β_1 hasta β_5 son los coeficientes de ajuste estadístico de la función potencial encontrada.

Se utilizaron un total de 45 eventos extremos ocurridos en el período 1987-2001, para el ajuste de los coeficientes de regresión. Específicamente se utilizó un 60% de los eventos para calibrar los coeficientes y un 40% para su validación. En la Tabla 1 se presentan los coeficientes resultantes. La bondad del ajuste fue evaluada a partir del coeficiente de correlación (r), resultando 0.916.

Tabla 1.- Coeficientes de regresión resultantes.

Coefficiente	Valor	Coefficiente	Valor
$\alpha_1=$	1.4588	$\beta_1=$	0.74302
$\alpha_2=$	0.0402	$\beta_2=$	0.80355
$\alpha_3=$	1.2795	$\beta_3=$	-0.27741
$\alpha_4=$	0.4410	$\beta_4=$	0.56595

Esta formulación es la base del sistema de alerta actualmente en funcionamiento en la ciudad de Durazno. Si bien esto significa un ajuste estadístico muy satisfactorio, y su implementación ha constituido para el CECOED un importante avance; desde el punto de vista operativo, realizar el alerta en base a esta formulación tiene algunas debilidades que se discuten e intentan mejorar en este trabajo.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es discutir las fortalezas y debilidades del Sistema de Alerta Temprana de la ciudad de Durazno, como medida no estructural contra inundaciones; así como proponer y evaluar posibles mejoras al sistema actualmente en funcionamiento.

METODOLOGÍA

A los efectos de realizar una evaluación del sistema de alerta actual, se realizó un análisis de las variables que intervienen en la formulación del alerta, abarcando los siguientes aspectos:

- 1) sensibilidad del nivel en Durazno frente a la incertidumbre o falta de información de alguna de las variables,
- 2) tiempos de antelación con que se realiza el alerta,
- 3) nivel de acierto en eventos pronosticados.

Para ello se contó, por un lado, con la experiencia transmitida por el CECOED en la operación del pronóstico en varios eventos de diferente magnitud, que nos brindó información sobre los 3 aspectos a evaluar planteados anteriormente. Por otro lado, se contó nueva información generada a partir de la evaluación de 3 eventos extremos ocurridos durante el desarrollo del proyecto PROHIMET: mayo 2011, junio 2011 y julio 2011.

Una de las principales dificultades encontradas con el actual pronóstico es la fuerte dependencia del nivel máximo del río en Durazno al nivel máximo del río en Sarandí del Yí. En efecto, operativamente, este último se desconoce al comienzo del evento, y cuando se alcanza el máximo nivel en Sarandí del Yí, el tiempo de antelación de la crecida en Durazno suele ser escaso. En consecuencia, ante la necesidad de disponer de mayor tiempo de antelación, el CECOED realiza una estimación arbitraria del nivel en Sarandí del Yí, durante los primeros días del evento. En muchos casos, esta estimación provoca resultados muy alejados de los reales en Durazno, debido a la fuerte dependencia de este nivel respecto al de Sarandí del Yí. En este contexto, se explora en este trabajo un procedimiento de mejora del sistema de alerta actualmente en funcionamiento cuyo principal objetivo es obtener un valor adecuadamente pronosticado del nivel máximo en Sarandí del Yí que minimice el error del pronóstico de nivel en Durazno, maximizando el tiempo de alerta. La estrategia metodológica seguida para ello se centró en pronosticar dicho nivel a partir de un modelo numérico hidrológico-hidrodinámico para la cuenca y río Yí.

En efecto, en el marco del proyecto PROHIMET, se realizó una modelación hidrológica de toda la cuenca del río Yí y una modelación hidrodinámica del río Yí entre Sarandí del Yí y una sección del río aproximadamente 40 Km. aguas abajo de Durazno (Figura 3). Se realizó el acople de los modelos que permitió la calibración y validación conjunta de sus parámetros (tiempos de concentración, número de curva, números de manning) utilizando datos de tormentas extremas observadas, entre las que se encuentran las tormentas de 2003, 2005, 2007 y 2010. Estos dos últimos eventos están asociados de los máximos niveles del río registrados en la ciudad de Durazno.

En base a esta modelación, se avanzó en el conocimiento físico del comportamiento del sistema frente a diferentes tipos de eventos, determinando tiempos de tránsito en la cuenca y el río, tiempos de alerta, valores mínimos de precipitación que provocan cotas de evacuación o inundación, etc.

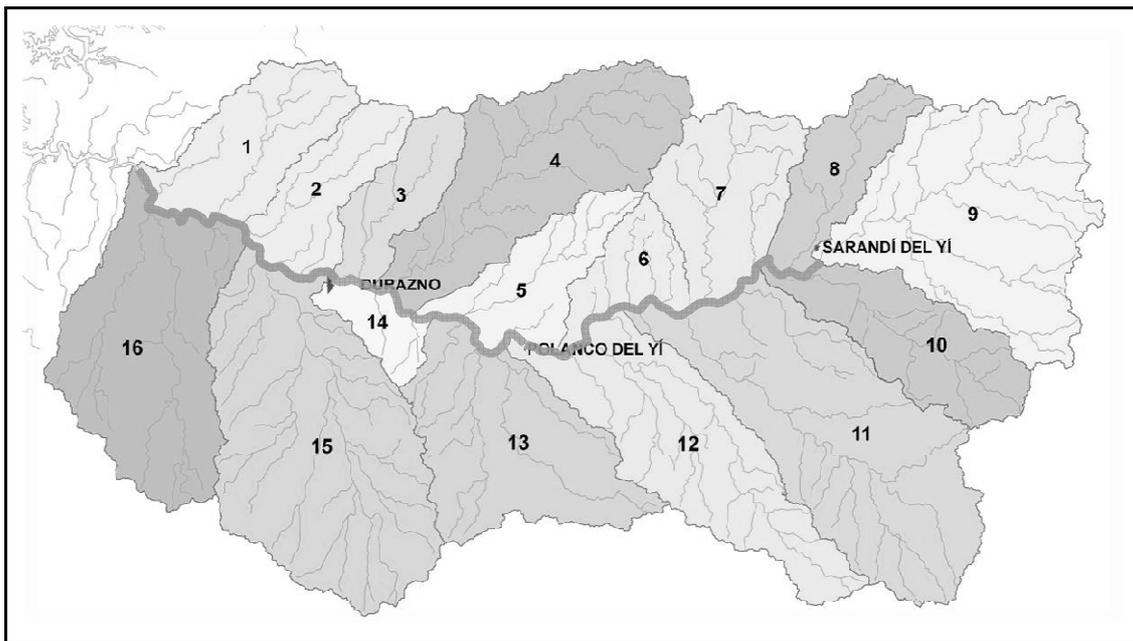


Figura 3.- Esquema del modelo hidrológico-hidrodinámico del río Yí implementado en el marco del proyecto PROHIMET. Se indica la división en sub-cuencas y el tramo de río modelado.

El modelo calibrado y validado permite a partir del registro de precipitaciones pronosticar el nivel en Sarandí del Yí, Polanco del Yí y Durazno, con un error inferior a 40 cm. y por tanto puede ser utilizado en combinación con el modelo de “Casos Blancos” (Ecuación 1), obteniendo del modelo numérico el nivel de Sarandí del Yí; o bien puede ser utilizado alternativamente al modelo de “Casos Blancos”. En este trabajo se describe más en detalle su utilización combinada, aunque se discuten y comparan ambas alternativas.

PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE ALERTA ACTUALMENTE EN FUNCIONAMIENTO.

A los efectos de realizar una mejora del sistema actual, en relación a la estimación del nivel máximo del río en Sarandí del Yí, se propone su obtención aplicando el modelo hidrológico calibrado a la cuenca de Sarandí del Yí, transformando el hidrograma de la cuenca en limnigrama en base a la curva de aforo en dicha estación, ajustada con el modelo hidrodinámico. Así formulada, esta propuesta de mejora consiste en la combinación de la aplicación del modelo físico calibrado (modelo numérico hidrológico-hidrodinámico) con la aplicación del modelo estadístico (modelo “Casos Blancos”).

A su vez, la precipitación en la cuenca de Sarandí del Yí se implementará de la siguiente forma:

- a) En base al valor observado de precipitación en los pluviómetros de la cuenca.
- b) En base al valor observado de precipitación del primer día y completando el hietograma en base a la forma del hietograma más probable construido para dicha cuenca.

c) En base al valor de precipitación pronosticado a partir de modelos numéricos globales del clima regional.

En este trabajo se evaluó únicamente el funcionamiento de este modelo combinado utilizando la implementación de precipitación indicada en a). No obstante, ya se dispone del hietograma más probable en la cuenca y los valores de precipitación de pronóstico, para realizar la evaluación incorporando las alternativas b y c de estimación de precipitación.

RESULTADOS

A los efectos de evaluar la propuesta de mejora, se simularon en tiempo real tres eventos de alerta, aplicando los siguientes métodos para pronosticar el nivel máximo en Durazno:

1. Método actual: modelo “Casos Blancos” (Ecuación 1) estimando cualitativamente el nivel máximo del río en Sarandí del Yí.
2. Método combinado: modelo “Casos Blancos” (Ecuación 1) estimando a partir del modelo hidrológico-hidrodinámico el nivel máximo del río en Sarandí del Yí.
3. Método en base a modelación: utilizar únicamente el modelo hidrológico-hidrodinámico para pronosticar el nivel máximo en Durazno sin utilizar el modelo de “Casos Blancos”.

Para la aplicación del método combinado (2), fue necesario extraer del modelo hidrológico-hidrodinámico la curva $H = f(Q)$ en la sección de cierre de la cuenca aguas arriba de Sarandí del Yí. Esta curva de aforos se presenta en la Figura 4. Se trata de una curva de aforo típica de un río de llanura aluvial, sin influencia de remanso en caudales extremos, donde por tanto puede observarse un bucle crecida-vaciado razonablemente estrecho. En efecto, el nivel a ser ingresado en la Ecuación 1 para el método combinado no es único, sino que es un rango definido entre el nivel de crecida y nivel de bajada para el caudal obtenido del modelo hidrológico.

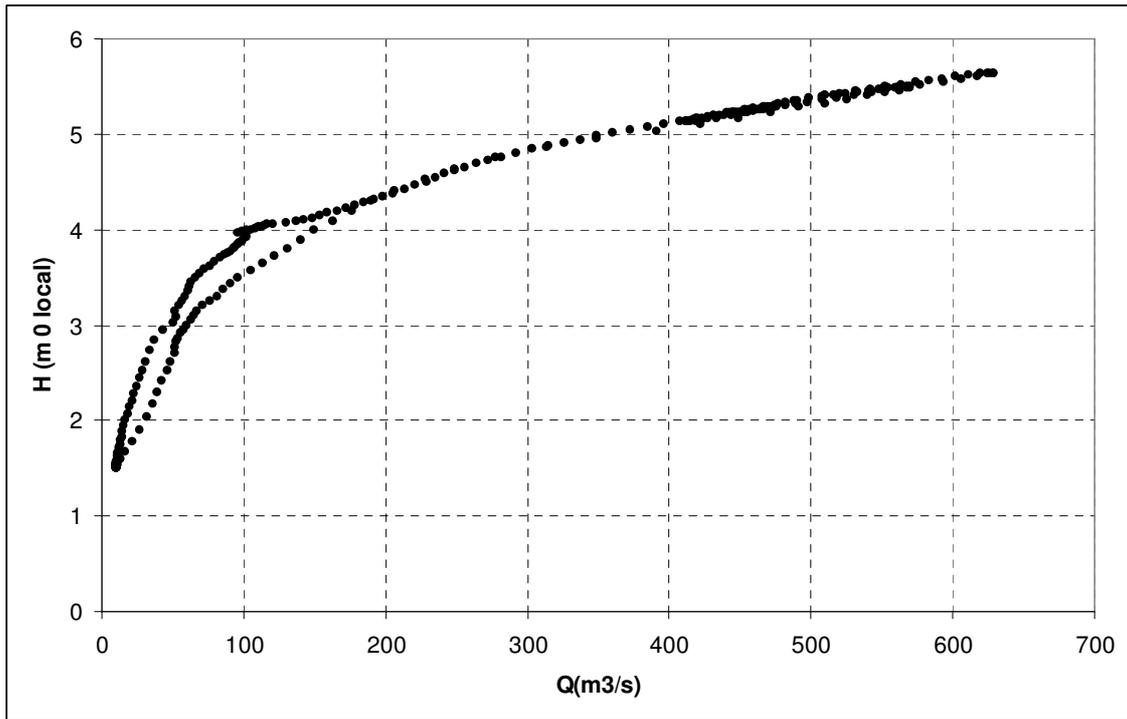


Figura 4.- Esquema Curva de aforos en Sarandí del Yí obtenida del modelo hidrológico-hidrodinámico. El cero de H corresponde al cero local de la estación limnimétrica ubicada en Sarandí del Yí, utilizado en el modelo “Cascos Blancos”.

Las tres metodologías fueron aplicadas para los tres eventos en tiempo real y los resultados de nivel máximo y tiempos de alerta fueron comparados. En la Tabla 2 se presentan los datos pluviométricos de cada uno de los eventos extremos simulados en tiempo real.

Tabla 2.- Hietogramas diarios de los eventos simulados en tiempo real.

Evento	P 2206 (mm)	P 2215 (mm)	P 2266 (mm)	P 2349 (mm)
25 Mayo 2011	82.5	80	90	87.6
26 Mayo 2011	8	0	9	7.3
27 Mayo 2011	0	0	0	0
17 Junio 2011	64	52	14	64
18 Junio 2011	0	0	0	0
19 Junio 2011	35	40	25	35
20 Junio 2011	14	10	0	14
21 Junio 2011	0	0	0	0
15 Julio 2011	106	97	123	78
16 Julio 2011	13	0	5	10
17 Julio 2011	0	0	10	5
18 Julio 2011	0	8	0	0

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos para el nivel máximo en Durazno (cero escala local) incluyendo los niveles máximos observados para cada evento. Como se comentó anteriormente, el resultado del método combinado es para cada evento un rango de valores asociado al bucle de la curva de aforos en Sarandí del Yí. Por su parte, en el caso del método actual (1), el desconocimiento del nivel máximo que ocurrirá en Sarandí del Yí hace que los integrantes del CECEOED estimen un rango de valores en función del nivel del río en Sarandí del Yí en ese momento (que no es el máximo) y en base a su experiencia en la operación de alertas. En la Tabla 3 (método actual), se incluye el valor medio del nivel máximo en Durazno asociado a un rango de valores estimados para el nivel en Sarandí del Yí.

Como puede apreciarse al comparar los resultados con los niveles máximos observados, los valores obtenidos por el método combinado resultan para los tres eventos una mejora significativa en relación al pronóstico aplicando el método actual. Por otro lado, los resultados obtenidos por el modelo hidrológico-hidrodinámico (Método 3) son los que mejor se ajustan a los niveles observados. Este resultado es esperable ya que el método 3 incluye la modelación de los fenómenos físicos que ocurren en la cuenca y el cauce, mientras que los anteriores se basan en relaciones estadísticas a partir de Sarandí del Yí.

A efectos de caracterizar los eventos modelados, vale destacar que si bien en los tres eventos ocurrió el desborde del río Yí, únicamente en el evento de Julio se registraron personas evacuadas en la ciudad, en número inferior en relación a las crecidas de 2007 y 2010.

Tabla 3.- Resultados de nivel máximo en Durazno obtenido de aplicar las tres metodologías.

Evento	Método Actual (1)	Método Combinado (2)	Modelo hidrol-hidrodin. (3)	Observado
24-25 Mayo	7.58 m	6.67-6.99 m	6.64	6.20 m
16-19 Junio	8.46 m	6.43-6.95 m	6.42	6.74 m
15-16 Julio	7.26 m	7.35- 7.53 m	8.30	8.62 m

En la Tabla 4 se presentan los resultados del momento donde ocurre el nivel máximo en la ciudad de Durazno pronosticado y observado. De las tres metodologías solamente la (3) es capaz de brindar este resultado, ya que los métodos basados en las relaciones estadísticas solamente permiten obtener el valor de nivel máximo sin información sobre el momento de su ocurrencia ni la duración de la inundación. Si bien se trata únicamente de 3 eventos simulados, se observa una buena aproximación a la fecha donde ocurre el máximo nivel.

Tabla 4.- Fecha de ocurrencia del nivel máximo en Durazno pronosticado y observado. Métodos 1 y 2 no brindan esa información, solo se obtiene el dato del nivel máximo.

Evento	Método Actual (1)	Método Combinado (2)	Modelo hidrol-hidrodin. (3)	Observado
24-25 Mayo	-	-	28 May 5:00	27 May 13:00
16-19 Junio	-	-	21 Jun 18:00	21 Jun 18:00
15-16 Julio	-	-	20 Jul 10:00	20 Jul 10:00

Por último en la Tabla 5 se presentan los resultados para los tiempos de alerta, que expresa la diferencia de tiempos entre que se obtiene el nivel máximo pronosticado en Durazno y el nivel máximo observado. Se destaca que las tres metodologías requieren como “input” el valor de precipitación del evento, por tanto el momento en el cual se obtiene el nivel pronosticado es el mismo para las tres, despreciando los tiempos de simulación del modelo hidrodinámico. Los resultados muestran para 2 de los tres eventos una anticipación mayor a 24 horas, mientras que para el evento de junio solamente la anticipación es del orden de las 12 horas. En este sentido, se entiende razonable aumentar estos tiempos de antelación a partir de incorporar en las tres metodologías información de pronóstico de precipitaciones diarias. Con ello el tiempo de alerta podría aumentarse al menos 24 horas en todos los eventos, asumiendo que el mejor pronóstico de precipitaciones es el más cercano a la ocurrencia del evento.

Tabla 5.- Resultados de los tiempos de antelación de nivel máximo en Durazno obtenido de aplicar las tres metodologías.

Evento	Tiempo alerta
24-25 Mayo	30 hs
16-19 Junio	11 hs

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

El interés principal de este trabajo era discutir y evaluar posibles mejoras a ser implementadas al Sistema de Alerta Temprana actualmente en funcionamiento para la ciudad de Durazno, Uruguay.

El Sistema de Alerta actualmente implementado reviste dos debilidades claramente identificadas. Por un lado, al basarse en una relación estadística entre precipitaciones y nivel máximo en Sarandí del Yí y nivel máximo en Durazno, no brinda información sobre cuando ocurrirán estos niveles máximos ni la permanencia de niveles de inundación. Por lo tanto, se desconoce cuanto tiempo se dispone para la evacuación de personas y bienes, el tiempo que estarán en refugios, la duración del corte de vías de transporte, etc. Asociado a ello, resulta muy difícil realizar una programación y/o previsión de los costos, alimentos, combustible y demás insumos requeridos para atender a la población durante la emergencia. Esta limitante del actual sistema de alerta es solamente levantada si se utiliza para el pronóstico el modelo hidrológico-hidrodinámico calibrado y validado en el marco del proyecto PROHIMET. Este modelo permite pronosticar el limnograma en diferentes puntos de la ciudad de Durazno asociado a un evento extremo, si se dispone únicamente de la información de precipitaciones diarias (u horarias) en la cuenca. Los niveles máximos pronosticados con esta herramienta para los 3 eventos simulados en tiempo real presentan un error máximo de 0.44 cm. y un error inferior a las ocho horas en el momento que ocurre el pico. Sin embargo esta herramienta tiene dos dificultades asociadas: a) es necesario conformar un sistema informático tipo “caja negra” que integre el modelo hidrológico al hidrodinámico y que la corrida de ambas partes del modelo sea automática e invisible al operador, ya que si bien el CECOED cuenta con personal asignado, el mismo no es experto en modelos numéricos de cuencas y cauces; b) si bien la resolución numérica de las ecuaciones de Saint Venant se realiza a partir de un esquema que teóricamente es estable, desde el punto de vista práctico muchas veces ocurren combinaciones de variables de ingreso (precipitaciones) que provocan la inestabilidad numérica del modelo.

Otra debilidad identificada en el Sistema de Alerta Temprana actual radica en el desconocimiento a priori del nivel máximo del río en Sarandí del Yí al momento de realizar el alerta, que constituye un “input” de primera importancia para el pronóstico del nivel máximo del río en Durazno. En efecto, la variable más sensible al nivel máximo en Durazno (en la Ecuación 1) es el nivel máximo en Sarandí del Yí, lo que se desprende directamente de los coeficientes de ajuste (Tabla 1). En la operativa actual se establece un rango de valores máximos posibles para el nivel en Sarandí del Yí en base al nivel existente al momento del alerta y la experiencia desarrollada por el CECOED. A los efectos de mejorar esta debilidad identificada, se propuso y evaluó calcular el nivel máximo en Sarandí del Yí en base a la aplicación del modelo hidrológico en la cuenca de Sarandí del Yí y la transformación con curva de aforo del caudal máximo en nivel máximo. La aplicación de este método combinado a los tres eventos simulados en tiempo real resultó en una mejora muy apreciable en el pronóstico del nivel máximo en Durazno, sin perder tiempo de antelación. Este método combinado, ofrece la ventaja frente a la aplicación completa del modelo hidrológico-hidrodinámico en toda la cuenca del río Yí, que solamente es necesario realizar la corrida del

modelo hidrológico evitando la corrida del modelo hidrodinámico. Esto evita potenciales dificultades asociadas a inestabilidades numéricas. La desventaja del método combinado radica en que no se dispone de la evolución temporal del nivel en Durazno, tal como sucede actualmente.

Para 2 de los 3 eventos analizados, los resultados de nivel máximo pronosticado en Durazno muestran que los errores respecto al nivel observado son equivalentes entre el método combinado y el modelo hidrológico-hidrodinámico, y significativamente menores que el método actual. En todos los casos estudiados el método combinado brinda mejores resultados que el método actual.

Un aspecto de importancia es el tiempo de alerta disponible para el trabajo del CECOED durante la emergencia. En ese sentido, dado que los tres métodos utilizan como “input” los valores de precipitación diaria, los tiempos de antelación son los mismos para los tres métodos. No obstante, para algunos de los eventos estudiados, estos tiempos han resultado inferiores a 24 horas, por lo que se entiende sumamente importante evaluar los métodos a partir de información de pronóstico de precipitaciones.

En base a todo lo anterior se entiende razonable actual en tres etapas:

- 1) Continuar evaluando los métodos 2 y 3 a partir de la simulación de un mayor conjunto de eventos en tiempo real.
- 2) Incorporar la información de pronóstico de precipitaciones en la aplicación de los métodos 2 y 3, evaluando su performance en tiempo real. Con ello, será posible aumentar el tiempo de alerta y por tanto mejorar la planificación de los procesos de evacuación.
- 3) Implementar en la operativa actual del sistema de alerta, como primera etapa de mejora, el método combinado para la previsión del nivel máximo en Durazno, ya que permite disminuir el error de pronóstico sin disminuir el tiempo de alerta.
- 4) Como segunda etapa de mejora, se sugiere agregar en la operativa del sistema de alerta, el pronóstico utilizando como herramienta principal el modelo hidrológico-hidrodinámico. Esto cuenta con la ventaja de tener mayor sustento físico y brindar la evolución temporal pronosticada de los niveles en la ciudad. Se remarca que el hecho de proponerlo en una segunda etapa radica en que es necesario un período de transición con quienes operan a diario el sistema de alerta, al pasar de un sistema simple (que hace más de dos años que utilizan y tienen confianza) a un sistema totalmente diferente, que brinda información diferente.

***Agradecimiento.** Los autores de este trabajo agradecen a la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA-MVOTMA), a la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE), a la Dirección Nacional de Meteorología (DNM) por la información hidro-climatológica suministrada. Asimismo se agradece al Centro Coordinador Departamental de Emergencias de Durazno (CECOED) por suministrar la información de la operativa del sistema de alerta actual durante las emergencias.*

LISTA DE SÍMBOLOS

H_D : nivel máximo del río Yí alcanzado en la ciudad de Durazno.

H_{SY} : nivel máximo del río Yí alcanzado en la ciudad de Sarandí del Yí.

- P_1 : precipitación acumulada en el pluviómetro 2215.
 P_2 : precipitación acumulada en el pluviómetro 2266.
 P_3 : precipitación acumulada en el pluviómetro 2395.
 P_4 : precipitación acumulada en el pluviómetro 2206.
 α_1 - α_5 : Coeficientes lineal de regresión para el modelo estadístico.
 β_1 - β_5 : Coeficientes potencial de regresión para el modelo estadístico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

OEA-BID-CB-MTOP. (2002). "Plan de emergencia para la ciudad de Durazno, República Oriental del Uruguay" Informe Final, Montevideo, Uruguay.

Silveira, L. et. al (2011). "Proyecto piloto de alerta temprana para la ciudad de Durazno ante las avenidas del río Yí". Informe de Avances. PROHIMET-FJR-IMFIA, Montevideo, Uruguay.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



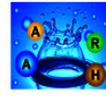
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investig. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

