

# **RIESGO DE INUNDACIONES EN EL RÍO LUJÁN**

**Jorgelina Reyna, Pablo Spalletti y José Daniel Brea**

Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua (INA)  
Casilla de Correo 21 – Ezeiza – Buenos Aires – CP 1804  
E-mail: jorgelinareyna@yahoo.com.ar; pspallet@ina.gov.ar; dbrea@ina.gov.ar

## **RESUMEN**

El objeto del siguiente trabajo es obtener un mapa donde se delimiten zonas con distintos niveles de peligro de inundación en la cuenca del río Luján, permitiendo estudiar el grado de afectación de eventuales inundaciones por crecidas y los riesgos asociados a dichos fenómenos en la población y actividades productivas de la zona. La metodología utilizada es sencilla y se basa en la aplicación de modelos hidrodinámicos y procesamiento de los resultados mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG).

La identificación de zonas con peligro de inundación mediante mapas, constituye una herramienta que permite plantear por un lado medidas estructurales, y por otro, distintas medidas no estructurales tendientes a dar pautas en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, particularmente en la planificación territorial, con miras a reducir los efectos ocasionados por las inundaciones.

## **ABSTRACT**

The object of the present paper is to obtain a map where zones with different flood hazard levels are delimited in the Luján river basin, allowing to study the degree of affectation of possible floods and the risks associated to these phenomena in the population and productive activities of the zone. The used methodology is simple and it is based on the application of hydrodynamic models and the processing of the results with a Geographic Information System (GIS).

The identification of zones with inundation hazard in maps, constitutes a tool that allows to raise structural and nonstructural measures. This tool is important in the Integrated Management of Hydraulic Resources, particularly in the territorial planning, to reduce the effects caused by floods.

## **INTRODUCCIÓN**

Las inundaciones son eventos extraordinarios en los que se habla de un exceso de agua en la superficie y plantea serios riesgos cuando sus efectos se encuentran interrelacionados con el hombre o las actividades que desarrolla, produciendo afectaciones económicas, sociales y ambientales (Paoli, C.; 2000).

Si la precipitación es intensa la cantidad de agua que llega simultáneamente a un río puede ser superior a su capacidad de drenaje, provocando inundación en las áreas ribereñas (Tucci, 1993). La precipitación provoca un incremento del caudal que transporta el río, pudiéndose presentar niveles líquidos que superen las cotas de las márgenes, e inundando las planicies o valles de inundación.

El riesgo de inundación es la probabilidad que ante un cierto evento de crecida sean afectadas las actividades económicas o sociales en un sitio particular y en un tiempo dado de exposición a la amenaza. Las medidas preventivas necesarias para reducir el riesgo involucran medidas legales y reglamentarias, reformas institucionales, educación, planificación financiera y compromiso político de los diferentes sectores, que tomen en cuenta los aspectos prioritarios de salud, desarrollo económico y medio ambiente.

La identificación de zonas con peligro de inundación mediante mapas, constituye una herramienta que permite plantear distintas medidas no estructurales tendientes a dar pautas en

la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, particularmente en la planificación territorial, con miras a reducir los efectos ocasionados por las inundaciones.

El trazado en mapas de las zonas con peligro de inundación se realiza previa determinación de los diferentes niveles de riesgo de inundación, para lo cual se debe realizar la descripción del funcionamiento hidráulico de la cuenca del río Luján.

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Luján se encuentra al noreste de la Provincia de Buenos Aires. El río Luján nace en la confluencia de los arroyos Durazno y Los Leones en el partido de Suipacha, presentando un eje de conducción central con una dirección sudoeste-noreste hasta la altura del cruce con la Ruta Nacional N° 9, donde tuerce hacia un rumbo sureste paralelo al Paraná de las Palmas. Finalmente, el río se confunde con el delta del Paraná, hasta desembocar en el río de La Plata (Figura 1).

El área de estudio abarca la totalidad de la cuenca del río Luján hasta su cruce con la Ruta Nacional N° 9. Ocupa una superficie total de 2.856 Km<sup>2</sup> en los partidos de Chacabuco, Carmen de Areco, Suipacha, Mercedes, Gral. Rodríguez, Luján, San Andrés de Giles, Exaltación de la Cruz, Pilar y Belén de Escobar.

Los cursos de agua que integran la cuenca están sujetos al régimen de lluvias locales y los principales son de carácter permanente, salvo en sus cabeceras en la épocas de estiajes. “El río se alimenta de precipitaciones pluviales y, en los tramos superior y medio, también de vertientes. Además, la cuenca está sometida a inundaciones periódicas y aperiódicas provocadas por las crecidas del Plata-Paraná y por el aumento de las precipitaciones” (Andrade, 1986).

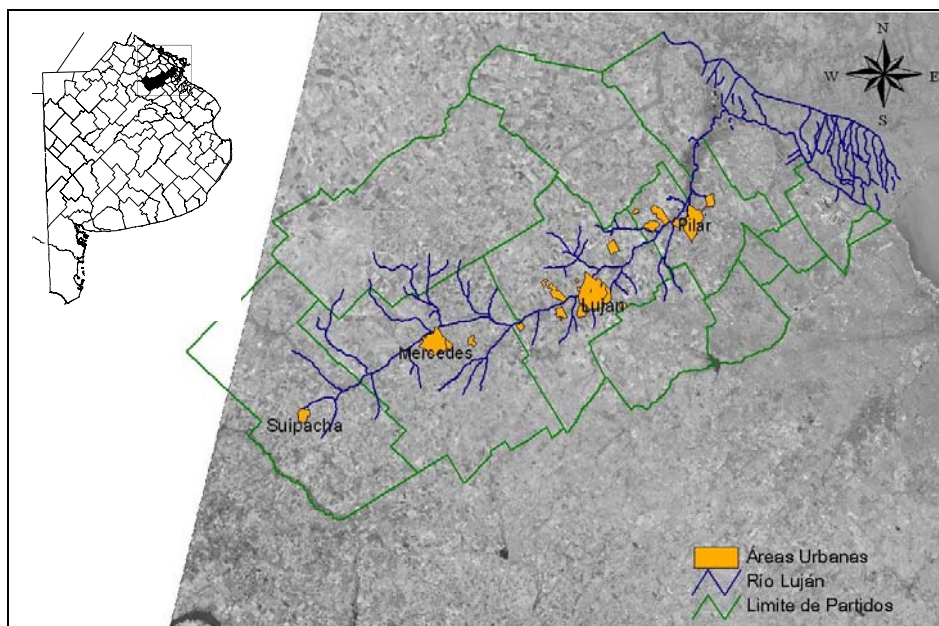


Figura 1.- Ubicación de la Zona de Estudio.

El trazado de la divisoria de la cuenca del río Luján se realizó sobre una imagen satelital, según el valor y disposición de las curvas de nivel (de cartas topográficas). En el presente estudio se adoptó como límite inferior de la cuenca la traza de la Ruta Nacional N° 9, y la sección del puente que atraviesa el río Luján, como sección de control.

Se desagregó la cuenca completa del río Luján en 35 subcuencas, dividiendo al cauce en 30 tramos (Figura 2). Esta tarea se realizó a partir de las curvas de nivel disponibles y operando con diversos módulos del SIG, que permitieron al tiempo en que se determinó la configuración planimétrica de estas áreas, definir varios de los parámetros necesarios para los posteriores análisis de procesamiento hidrológico.

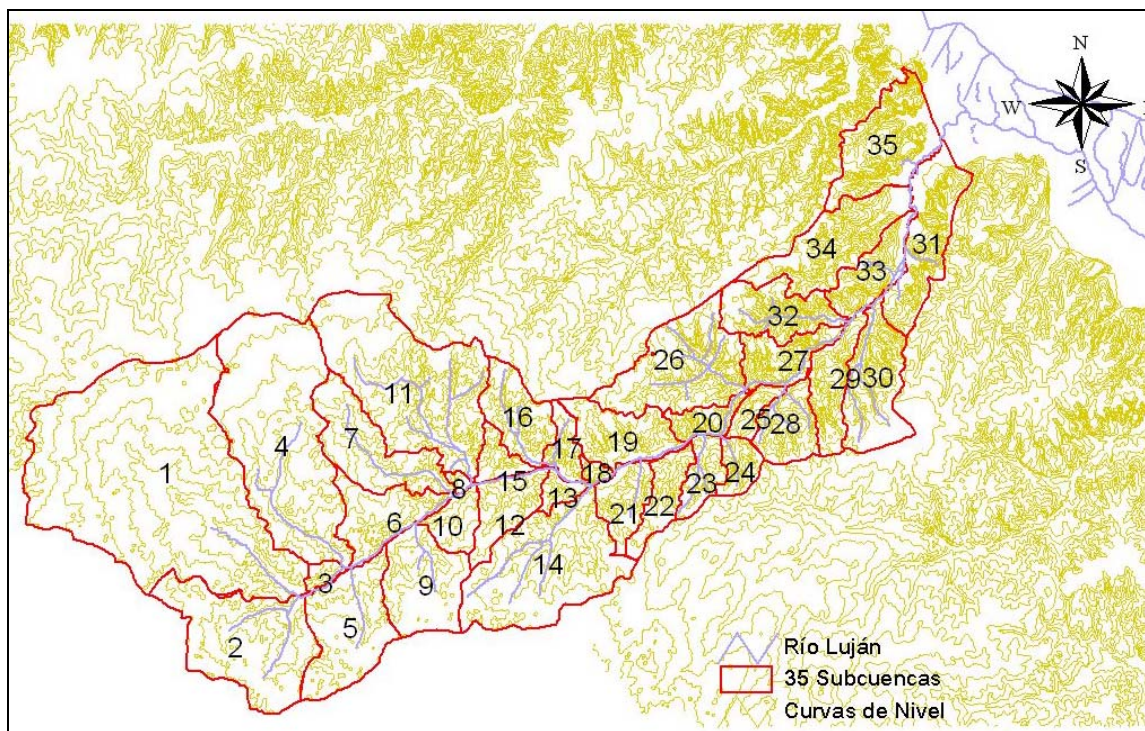


Figura2.- Sistema del río Luján, subdividido en 35 subcuencas.

## METODOLOGÍA EMPLEADA

La metodología propuesta considera el grado de riesgo hídrico en función de los niveles de escurrimiento que el río Luján alcanza para distintas recurrencias. Los niveles o alturas de inundación asociados a distintas recurrencias se determinan mediante un modelo hidrodinámico, evaluando a través del tiempo los niveles, caudales y velocidades de escurrimientos unidimensionales, en diferentes secciones transversales a la dirección principal del flujo.

La implementación del modelo hidrodinámico requiere identificar el esquema físico mediante los datos topográficos en forma de perfiles transversales del cauce y zonas de desborde, y la caracterización de las obras de paso o control que puedan afectar el comportamiento hidráulico del sistema. Además, es necesario definir las condiciones de borde e iniciales, que funcionan como elementos desencadenantes y condicionantes de la simulación, para lo cual se utilizan los datos hidrológicos.

La implementación incluye una etapa de calibración de los parámetros del modelo previa a las corridas de producción o simulación del sistema a representar. Los hidrogramas de aporte líquido constituyen condiciones de borde que varían en cada etapa de la implementación, de acuerdo a los datos hidrológicos disponibles.

La escasez de datos de caudales medidos en la cuenca del río Luján, hacen necesaria la estimación de los hidrogramas que se generan en cada área de aporte. Los hidrogramas de escorrentía directa se obtienen aplicando el modelo hidrológico HEC-HMS que utiliza métodos de precipitación-escorrentía.

En la etapa de calibración se utilizan datos medidos y en particular, para este estudio, se contó con registros de precipitación para una tormenta característica y los caudales asociados medidos en una progresiva próxima al balneario de la ciudad de Luján. Las corridas de producción se realizaron a partir de lluvias hipotéticas máximas asociadas a distintas duraciones y períodos de retorno, que se calcularon con una serie de datos de lluvias de la estación INTA Castelar, a los cuales, primero se les realizó un análisis de frecuencia de las series de precipitaciones anuales maximizadas, luego se aplicó la distribución temporal de la tormenta de Huff y finalmente, se consideró una variación espacial de las tormentas en la dirección del escurrimiento del río Luján.

El modelo HEC-HMS asocia a cada subcuenca un área, pérdidas de precipitación, métodos de transformación de escurrimientos y para el presente cálculo no se consideró el flujo basal. Las pérdidas de precipitación se calculan para condiciones de humedad antecedentes normales, utilizando el método del Número de Curva desarrollado por el SCS, para lo cual requiere conocer las pérdidas de lluvias iniciales, el parámetro CN y el porcentaje de áreas impermeables. La transformación de las precipitaciones netas a los hidrogramas se realiza con el método del hidrograma unitario adimensional del SCS, que se calcula en función del tiempo de retardo. En la determinación de algunos de estos parámetros fueron utilizadas como información de base imágenes satelitales y fotografías aéreas.

Una vez aplicado el modelo HEC-HMS sobre las subcuencas que aportan al sistema del río Luján, el traslado de las crecidas en el cauce del río Luján se evalúa mediante el modelo hidrodinámico MIKE 11 (software desarrollado por el Danish Hydraulic Institute). Los hidrogramas transitan hacia aguas abajo y se van sumando progresivamente hasta determinar los hidrogramas trasladados de escorrentía total en las distintas secciones de control establecidas (V. Te Chow, 1994).

Respecto de la restitución, en la sección extrema de aguas abajo se tomaron como condición de borde, niveles líquidos. Los mismos se definieron en función de las características del tramo final del modelo, de manera tal que sus efectos en el funcionamiento hidráulico del sistema sean mínimos.

### **Resultados del modelo hidrodinámico**

El parámetro más representativo del modelo hidrodinámico, es el coeficiente de rugosidad “n de Manning”, por lo que la calibración consistió en su ajuste. El programa permite simular los escurrimientos para distintos coeficientes de rugosidad del cauce y su planicie, y de la comparación de los resultados de las corridas con los registros históricos (datos en la sección

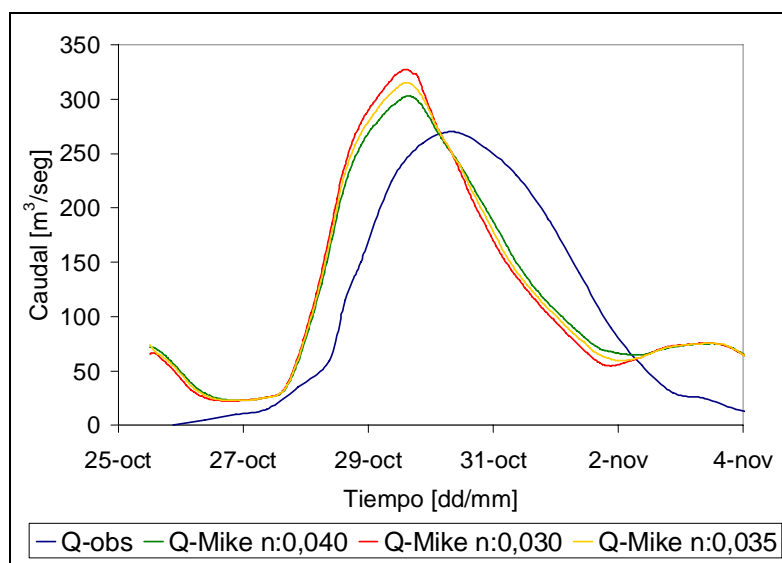
de control definida por el balneario de la ciudad de Luján), se verificó una adecuada elección de los coeficientes de resistencia al escurrimiento.

En las secciones transversales del río Luján, se distingue un canal central y las planicies de inundación circundantes. Dado que el coeficiente de rugosidad adopta distintos valores para cada tipo, forma y disposición de la vegetación, se adoptó una relación entre el canal principal y las planicies de inundación de 1:3. De acuerdo, a observaciones realizadas del río Luján y a la bibliografía existente, el cauce central del río Luján puede caracterizarse con un coeficiente de rugosidad  $n$  de 0.035.

Se realizó un análisis de sensibilidad en relación al  $n$  de Manning, analizándose el comportamiento hidráulico para valores del coeficiente de rugosidad en el cauce de 0.030, 0.035 y 0.040, siempre asumiendo que la rugosidad en el valle es tres veces mayor.

Los datos de entrada o alimentación al modelo son los hidrogramas generados para la tormenta del 25/10/84 al 07/11/84.

La Figura 3, muestra la comparación de los hidrogramas registrados y calculados con el modelo para los  $n$  de Manning considerados, en la sección de progresiva 59300 metros que se corresponde con el balneario de la ciudad de Luján.



**Figura 3.-** Análisis de sensibilidad al  $n$  de Manning.  
Sistema del río Luján desagregado en 35 subcuencas.

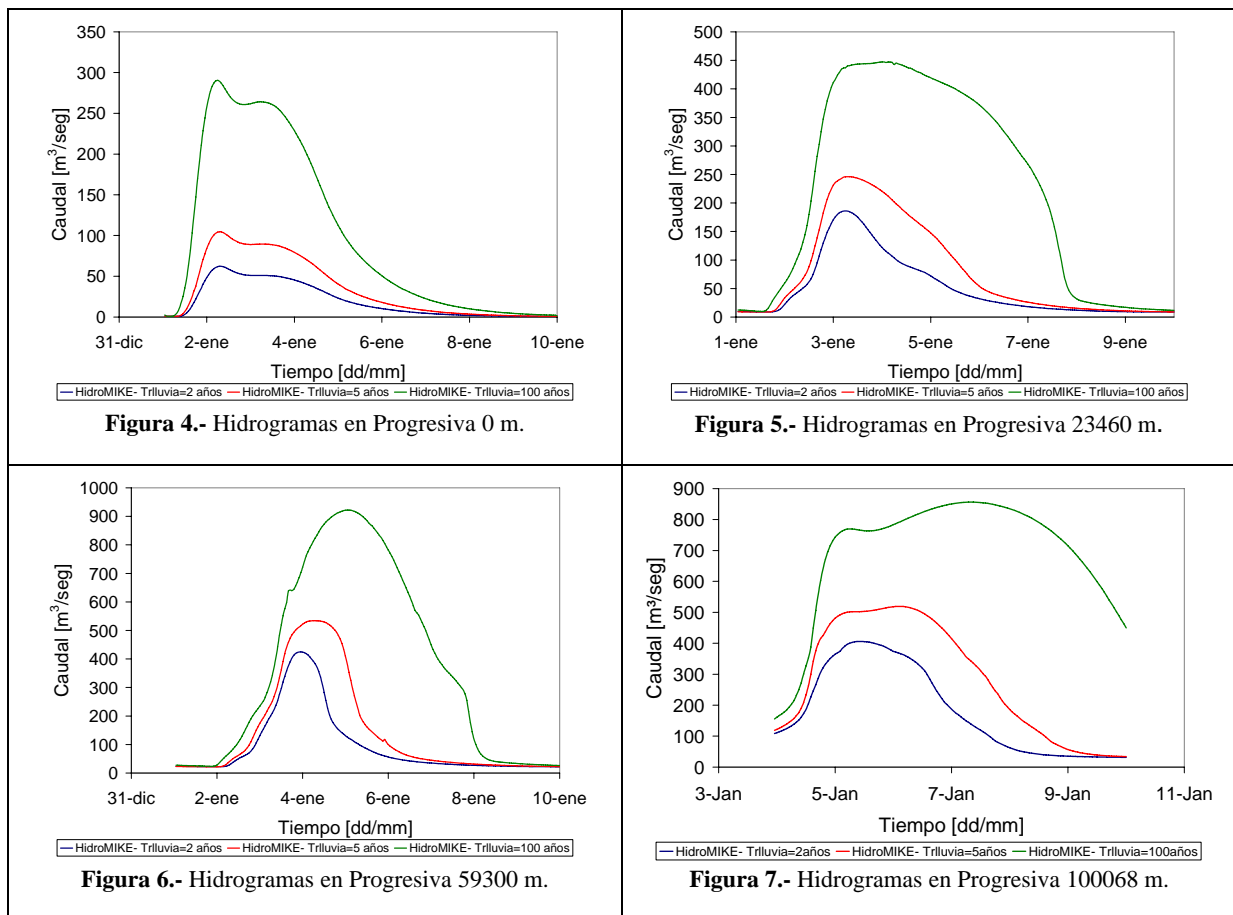
A partir de los valores recomendados en la bibliografía y de los resultados de las corridas de calibración, se adoptó, para las corridas de producción, un coeficiente de rugosidad  $n$  para el cauce de 0.035, con el que se obtuvieron resultados compatibles entre el modelo implementado y los datos disponibles, sobre todo teniendo en cuenta la escasez y calidad de los registros históricos.

En las corridas de producción se plantearon situaciones hipotéticas, donde las condiciones de borde se definieron mediante los hidrogramas de las subcuencas de aporte, asociados a distintas recurrencias de precipitaciones (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años). En el presente trabajo

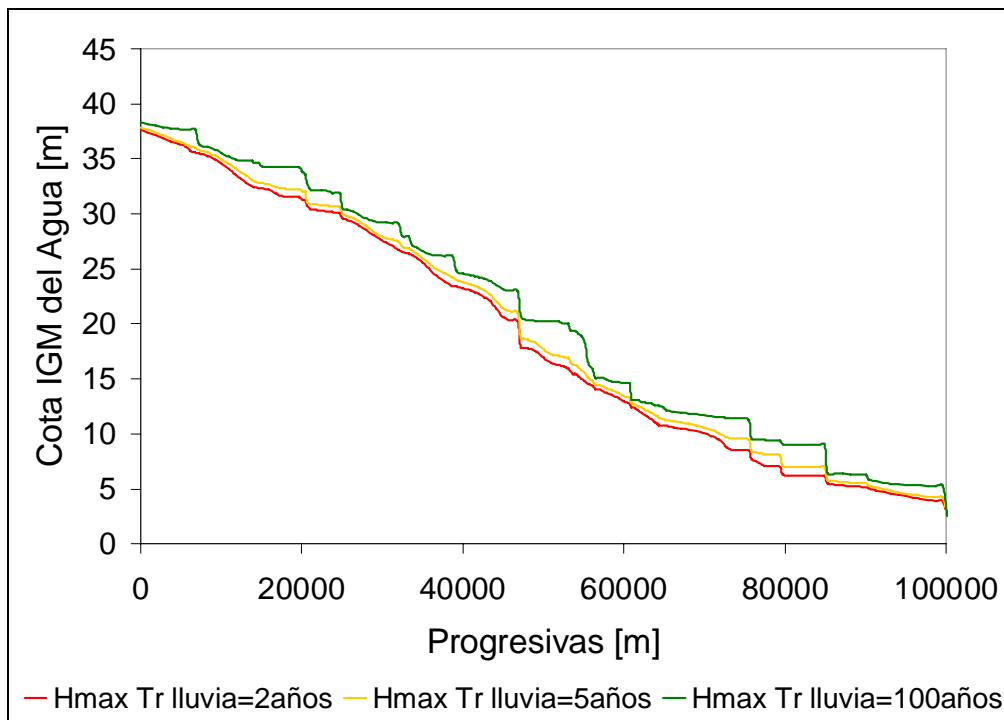
se presentan los resultados para 2, 5 y 100 años de período de retorno, por considerarse situaciones representativas de una crecida ordinaria, una media y una extraordinaria.

En la progresiva final, la condición de contorno es una altura de agua cuyo valor es función de las características físicas del cauce. Los niveles de agua en esta sección no se consideran afectados por los efectos de remanso del río de la Plata, ya que se ven amortiguados por un sistema de lagunas y bajos ubicados aguas abajo de la Ruta Nacional 9.

Para visualizar los hidrogramas trasladados y sumados, en las corridas de producción, se identificaron cuatro secciones de control (Figuras 4 a 7).



La Figura 8 presenta la totalidad del perfil longitudinal del río Luján en el tramo estudiado (cuya longitud es del orden de los 100 kilómetros), donde se indican los niveles máximos de agua obtenidos de los resultados del modelo implementado, para las tres recurrencias consideradas.



**Figura 8.-** Perfil Longitudinal con los Niveles Máximos de Agua.  
Sistema del río Luján desagregado en 35 subcuencas.

### Identificación zonas de peligro-riesgo

Los datos de niveles máximos en cada sección transversal asociados a las recurrencias de interés, permiten identificar distintas zonas de peligro. Las zonas se identifican realizando una serie de análisis en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

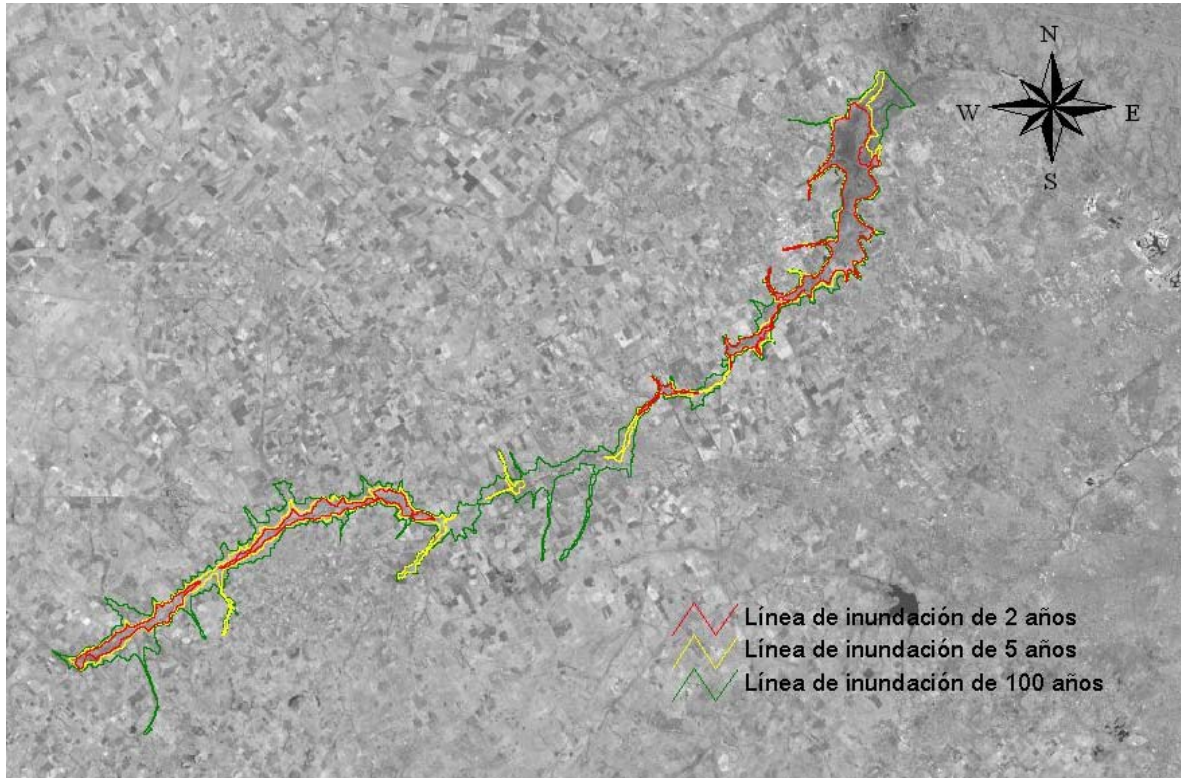
En primer lugar, con la totalidad de la información topográfica disponible tanto en el cauce como en el resto de la cuenca, y utilizando módulos específicos del SIG, que permiten tener en cuenta las vías principales de flujo, se construyó el modelo digital del terreno (MDT) para la cuenca del río Luján. El MDT es una modelación de la topografía compuesta por un mosaico de celdas de pequeñas dimensiones que cubren la totalidad de la zona de estudio, y a las que se les asigna un valor de cota representativo.

Luego, se definió un modelo digital de la cota de inundación para distintos períodos de retorno. Esta tarea se realizó definiéndose perfiles transversales suficientemente largos como para abarcar el cauce y el valle de inundación completos, en correspondencia con todas las secciones del río en que se contaba con resultados de niveles líquidos. A estos perfiles se les asoció la cota máxima del pelo de agua, y para cada recurrencia se interpoló la superficie definida por la ubicación planimétrica de los perfiles y los niveles de la inundación obtenidos con el modelo hidrodinámico. De esta manera, para cada situación estudiada, queda definida una superficie que se corresponde con una envolvente de los niveles registrados durante la simulación.

Operándose celda a celda entre el MDT y los modelos digitales de cota de inundación, se determinaron, para cada uno de los casos analizados, las zonas con desbordes sobre el terreno natural. De esta forma, se obtuvieron mapas generales que muestran las distintas situaciones de peligro de inundación en función de las recurrencias de lluvia.

## EVALUACIÓN DE RESULTADOS

La Figura 9 presenta el mapa de inundación obtenido para distintas recurrencias de precipitación, a partir del análisis con 35 áreas de aportes.



**Figura 9.-** Mapa de peligro de inundaciones de la cuenca del río Luján.  
Sistema del río Luján desagregado en 35 subcuencas.

Tal como se ha indicado, y de acuerdo al criterio consensuado de los últimos años, el peligro está asociado con los procesos o eventos con potencial de generar pérdidas, que pueden ocurrir naturalmente o inducidos por el hombre, mientras que riesgo se define como la exposición de algo de valor a un peligro y se considera habitualmente por la combinación de probabilidad y pérdida (Brea et al., 1999).

Organizaciones internacionales (Varnes, 1984) proponen que el riesgo específico ( $R_s$ ), que es la pérdida esperada debida a un fenómeno natural particular, sea definida como:

$$R_s = H \cdot V$$

donde  $H$  es la probabilidad de ocurrencia de un peligro natural en un período de tiempo específico y en un área con fenómenos potencialmente dañinos; y  $V$  es la vulnerabilidad, definida como el nivel de pérdidas resultante de la ocurrencia de un fenómeno natural de una cierta magnitud.

El riesgo total o sea las pérdidas (vidas humanas, lesiones, daños a la propiedad, actividades económicas) debidas a un fenómeno natural particular es entonces:

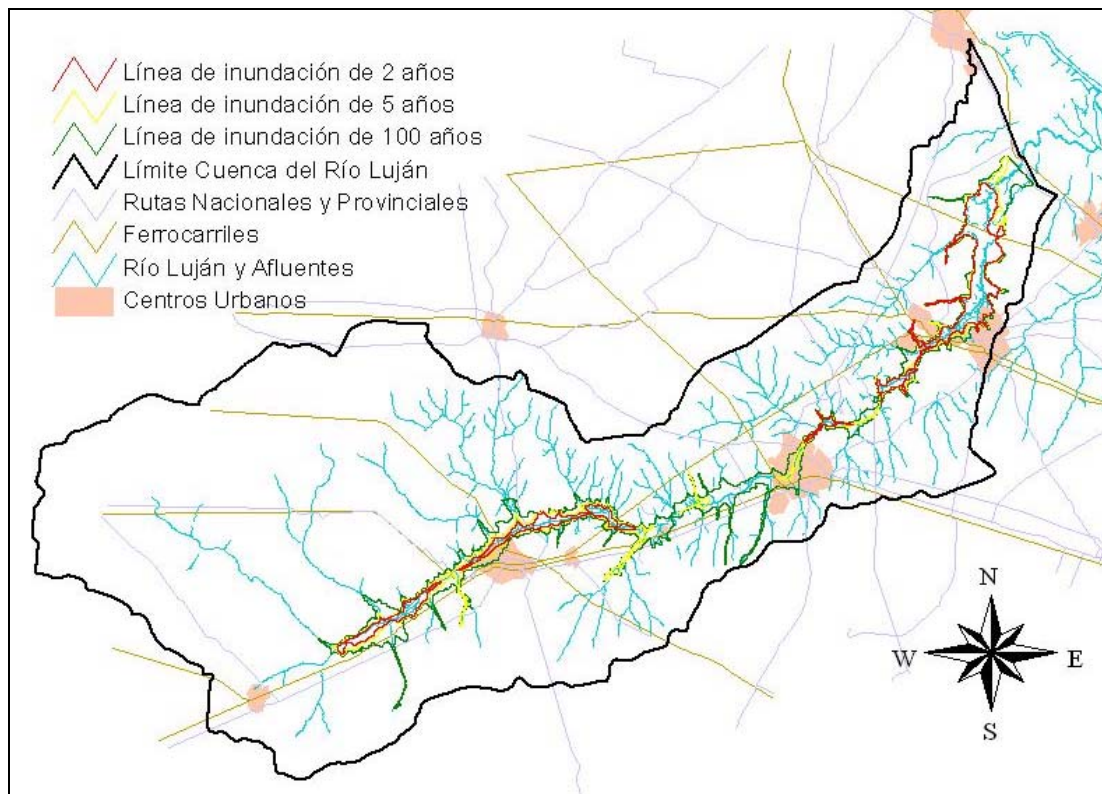
$$R = R_s \cdot E$$



siendo E los elementos en riesgo en un área determinada.

Lo dicho pone de manifiesto que para analizar el riesgo también debe tenerse presente la distribución de las poblaciones, la infraestructura y los sectores con desarrollo de actividades productivas.

En la Figura 10 se vinculan el sistema de drenaje natural y los elementos estructurales presentes en la cuenca (camino, ferrocarriles, centros urbanos, etc), con las líneas de peligro de inundación correspondientes a la desagregación en 35 subcuencas, de esta forma se obtiene preliminarmente un mapa de riesgo de inundaciones.



**Figura 10.-** Mapa de peligro de Inundaciones.  
Sistema del río Luján desagregado en 35 subcuencas.

Las representaciones gráficas permiten concluir que las líneas de recurrencias bajas (2 años), se mantienen en su mayor parte confinadas dentro del cauce del río Lujan, exceptuando escasas áreas en cercanías de la ciudad de Mercedes y hacia el tramo aguas abajo en las proximidad de la ciudad de Pilar.

Las líneas de recurrencia media (5 años), siguen las tendencias vistas anteriormente, pero comienza a notarse la influencia de las distintas estructuras que interfieren el escurrimiento, con un incremento en las áreas de inundación aguas arriba de las mismas (Figura 8).

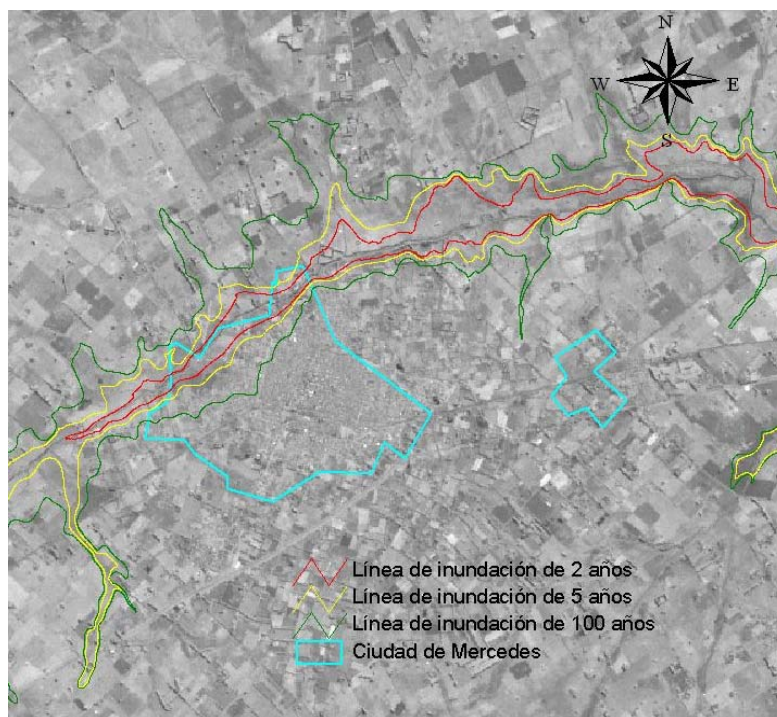
Por último, las líneas determinadas para 100 años de recurrencia, muestran una zona de afectación en ambos márgenes en prácticamente toda la longitud del río Luján, con severas influencias en las zonas urbanas y en las vías de comunicación, afectando asimismo las condiciones de descarga de los tributarios al curso principal.

Con estas representaciones se determinaron las áreas de influencia de cada zona de peligro respecto a las inundaciones (Tabla 1).

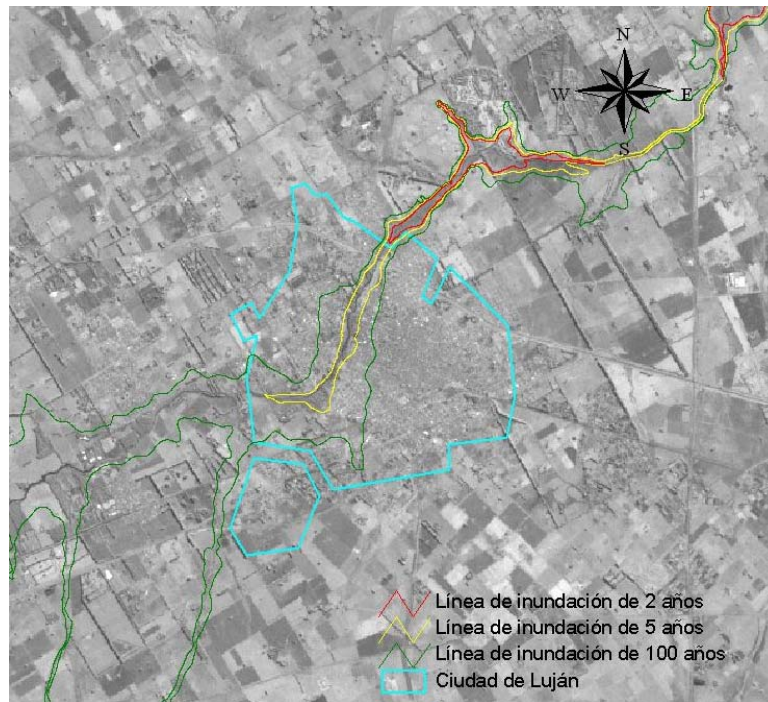
**Tabla 1.** Áreas de influencia de las zonas de peligro.

Características	Sistema desagregado en 35 subcuenas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• zona de peligro para 2 años de recurrencia</li> <li>• zona de peligro para 5 años de recurrencia</li> <li>• zona de peligro para 100 años de recurrencia</li> </ul>	<p>62 km<sup>2</sup></p> <p>91 km<sup>2</sup></p> <p>181 km<sup>2</sup></p>

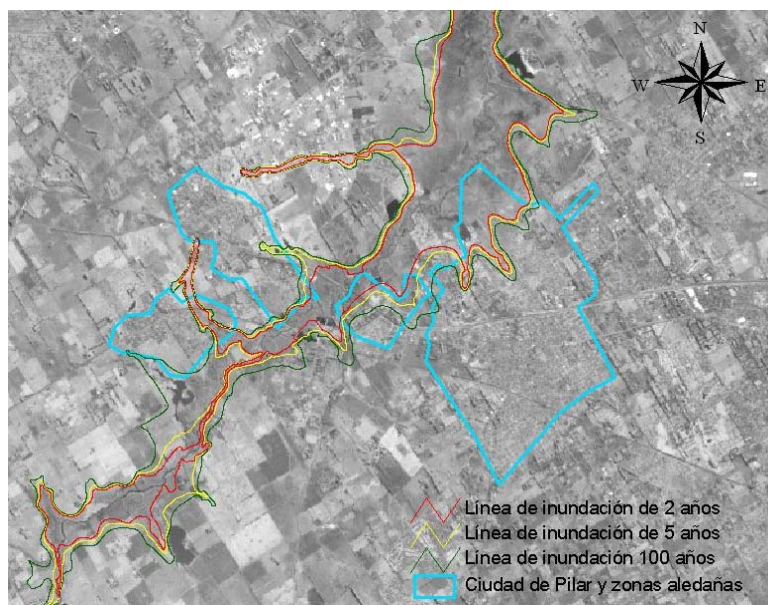
A modo de ejemplo, con el objeto de observar en detalle el grado de afectación de sectores urbanos, infraestructura y zonas productivas, las Figuras 11, 12 y 13 muestran las ciudades de Mercedes, Luján y Pilar respectivamente, con las distintas zonas de peligro de inundación. En estas ciudades se aprecia una importante afectación del área urbana para inundaciones provocadas por lluvias de recurrencias altas. Esto, podría ser una pauta a tener en cuenta en áreas en crecimiento en la cuenca, de similares características a las de las localidades, para plantear medidas estructurales que permitan controlar los efectos de las crecidas, o no estructurales que circunscriban su desarrollo urbanístico fuera de las zonas que presentan algún nivel de peligro respecto a los desbordes del río.



**Figura 19.-** Identificación de zonas bajo riesgo hídrico en la ciudad de Mercedes.



**Figura 20.-** Identificación de zonas bajo riesgo hídrico en la ciudad de Luján.



**Figura 21.-** Identificación de zonas bajo riesgo hídrico en la ciudad de Pilar.

La identificación de las zonas de riesgo como producto de investigación es una herramienta a aplicar al momento de realizar la gestión integrada de los recursos hídricos. Las limitaciones prácticas que presenta el método se podrían complementar con la participación social, lo que le daría un enfoque más amplio: “en el sentido que el conocimiento producido sea un insumo para las decisiones de intervención e inversión del Estado y configure un documento de base realizado en forma asociada y colaborativa por grupos de actores diversos” (Poggiese, 2001).

## CONCLUSIONES

A partir de las metodologías de análisis desarrolladas en el presente trabajo y de los resultados obtenidos, puede concluirse que:

- En la metodología aplicada se utiliza un modelo hidrodinámico para el cálculo de los niveles máximos asociados a distintas recurrencias, y un sistema de información geográfica para determinar las zonas de riesgo de un área en particular. Estas técnicas son versátiles respecto de la incorporación de nueva información. La correcta implementación del modelo requiere una detallada descripción del sistema físico a representar (topografía, medición de las estructuras), y de los hidrogramas o caudales a simular.
- Los mapas resultantes constituyen una herramienta de gran importancia para la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca, y permiten plantear distintas medidas estructurales y no estructurales en las áreas afectadas tanto rurales como urbanas.
- Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran las zonas de recurrencias bajas confinadas dentro del cauce del río Luján; en las zonas de recurrencias medias comienza a notarse el efecto de las estructuras que interfieren el libre escurrimiento del río; y las zonas de recurrencias altas afectan toda la longitud del río, con severas influencias en las áreas urbanas, vías de comunicación y en las condiciones de descarga de los tributarios al curso principal.
- Es necesario instalar elementos de medición de las distintas variables hidrológicas e hidráulicas: precipitación, evaporación, niveles líquidos, velocidad de flujo, caudales, humedad del suelo, infiltración, niveles freáticos, etc., que permitirían explicar mejor los procesos y mejorar la información de entrada en el modelo de simulación propuesto en el presente trabajo. La disponibilidad de datos en secciones características del sistema, entre ellas la sección de control definida por el puente de la Ruta Nacional N°9, permitirá una determinación más precisa de los valores del coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning en cada tramo del río Luján y su planicie de inundación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Andrade, M. I; Carvajal, A.; Yanes, L.; y otros.** (1986). *Factores de deterioro ambiental en la cuenca del río Luján*. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Buenos Aires. Argentina.

**Brea, J.D.; Gaviño Novillo, J.M.; Spalletti, P.D.** (2000). "Erosion Risk Assessment in a Southern Patagonian Watershed", *Quaderni di Hidronomia Montana N.20*. Editoriale BIOS., pp. 257-266.

**Chow, Ven Te; D. R. Maidment y L. W. Mays** (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill

Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.

**Huff, F. A.** (1967) *Time Distribution of Rainfall in HeavyStorm*. Water Resources Research , v. 3, n. 4, p. 1007-1019.

**Paoli, C. y Giacosa, R.** (2003) “*Caracterización del riesgo hídrico con relación a las inundaciones y a las crecidas y lluvias de diseño*”. Inundaciones en la región de pampeana. Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires. Argentina.

**Poggiese, H.** (2001). “*Percepción social del riesgo*”. Curso Internacional de Postgrado: Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. Argentina.

**Tucci, C.** (1993). *Hidrologia: ciencia e aplicacao*. Editora da Universidades. UFRGS-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

**Varnes, D.J.** (1984). *Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice*. Commission on landslides of the IAEG, UNESCO. Natural Hazards No. 3,61 pp.