

Cosa e' Mandinga ¿Será que crece lo mismo y se inunda más? Un apunte crítico sobre inundaciones urbanas pampeanas y crecidas ribereñas

Leandro Giordano^{1,2}, Carlos Ruggerio², Pamela Flores², Juan Bianchi¹

¹Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico, Instituto Nacional del Agua

²Área de Ecología, Instituto del Conurbano, Universidad Nacional de General Sarmiento

E-mail: lgiordano@ina.gob.ar

RESUMEN

Partimos de la asunción que la frecuencia de inundación por crecida ribereña se ha incrementado en los últimos años para el caso de algunos asentamientos urbanos situados sobre la planicie chaco-pampeana, emplazados en el noreste de la provincia de Buenos Aires. Esta hipótesis forma parte de un marco teórico consensuado tanto por académicos como por tomadores de decisión, ampliamente difundido por los medios masivos de comunicación. A la vez, suele asumirse que el incremento en la periodicidad de la inundación se debe, principalmente, a un aumento en la intensidad y/o frecuencia de crecidas. En efecto, las posiciones más difundidas apoyan esta afirmación sobre la base de dos factores principales: (a) variación significativa en el régimen de precipitación o (b) prácticas de manejo inadecuadas. Aún así, identificamos elementos cuestionables en esto último, señalando la necesidad de un ejercicio crítico. Primeramente, en la elaboración de este discurso no se presenta información que de cuenta de cambios en la frecuencia de la amenaza (o sus forzantes). Y más de fondo: la frecuencia de una inundación no es necesariamente la misma que la de una crecida y, de ahí, una equiparación directa puede llevar a una simplificación excesiva.

La inundación es un fenómeno emergente de la relación entre una amenaza hídrica y una forma de producir espacio (urbano). Luego, dada la expansión urbana experimentada en el noreste de Buenos Aires, resulta consecuente explorar si el incremento en la frecuencia del desastre puede explicarse en mayor medida por un incremento en exposición más que por cambios en la estructura temporal de la amenaza. Por tanto, hemos seleccionado como caso de estudio las crecidas ribereñas del río Luján sobre el tramo comprendido entre las rutas provinciales 42 y 6, analizando la estructura temporal de las variables hidrometeorológicas (precipitación, nivel hidrométrico/caudal) y socio-demográficas, tanto como su relación.

INTRODUCCIÓN

Marco teórico

Una inundación ocurre en tanto el agua se localiza en lugar y tiempo no deseados ¿No deseados por quién? Por el que ocupa el espacio, por cómo lo ocupa. Más aun, por cómo apropia y transforma el medio físico y, sobre todo, por cómo lo valora. Y esto debido a que este proceso está mediado siempre por el trabajo humano (Ríos y González, 2011). En un marco teórico más general, entendemos a la inundación como un evento que ocurre en un sistema territorial complejo, perturbando de alguna forma sus relaciones funcionales (Minciardi et al., 2006; Pascale et al., 2009). Particularmente, es un emergente del vínculo entre el medio social y el medio físico en la producción del espacio geográfico del sistema territorial (Lindón, 1989; González, 2006; Minciardi et al., 2006; Viandt y González, 2012).

El evento puede ocurrir en distintos momentos y lugares del sistema territorial, caracterizándose por una intensidad, una permanencia en el tiempo y una extensión espacial (Douben, 2006). En primer lugar, algo que resulta intuitivo es el carácter recurrente de la amenaza, un rasgo típico de esta. Algo propio de la definición de evento en un sistema natural, e.g. la planicie aluvial de un río es un indicador de la variación cuasi-periódica de su energía: el desborde del río es un hecho recurrente. Algunos de los factores involucrados en la ocurrencia de la amenaza son caóticos (e.g. las lluvias), mientras otros presentan oscilaciones más suaves o una estructura más organizada, al menos en el dominio de tiempo (e.g. contenido de humedad antecedente). Luego, si la inundación emerge por la interacción de la amenaza con el sistema social, el carácter recurrente se transmite. Así, se ha impuesto la noción de recurrencia tanto en el análisis como en el imaginario colectivo de las inundaciones, muchas veces simplificándola a la recurrencia de la amenaza, error propagado desde la equiparación de conceptos en la definición de inundación (González, 2006; Viandt y González, 2012). En efecto, la recurrencia de una inundación no necesariamente es la recurrencia de la amenaza: la última puede permanecer constante, o sin cambios significativos, y la primera variar. El avance de la población urbana sobre las márgenes de un tramo de río, que no ha presentado cambios en la estructura temporal del nivel hidrométrico, es un ejemplo de esto. Estrictamente, la recurrencia de la inundación es la que corresponde al fenómeno emergente en la producción de espacio geográfico. Esto es, la dinámica de la inundación dependerá tanto de la dinámica de la amenaza, que se manifiesta recurrentemente por la variación cuasi periódica de sus forzantes, como de la dinámica de ocupación del espacio, cuyo pulso está intensamente vinculado a lógicas socio-económicas (e.g. condiciones de mercado, condiciones políticas). La Fig. 1 esquematiza, de forma simplificada, las componentes de la dinámica propias en el caso de las inundaciones urbanas.

Así pues, el carácter recurrente es intrínseco al fenómeno de inundación aunque, cabe añadir, esto no necesariamente implica que la periodicidad sea invariante en tiempo y lugar del sistema territorial pues las dos dinámicas involucradas pueden presentar cambios significativos y, de ahí, su interacción (Kundzewicz,

2001; Vogel, 2011). Así, en principio, identificamos dos factores que atentan contra la hipótesis de estacionariedad en la recurrencia de inundaciones. En primer lugar, la producción del espacio geográfico suele conducir a modificaciones dentro del estado de un sistema territorial. Por ejemplo, el crecimiento urbano en muchos sitios bonaerenses ha sido acompañado por expansión y densificación de las aglomeraciones, ocupándose zonas propensas a anegamientos por desbordes de ríos y arroyos (Bertoni, 2004; Di Pace y Barsky, 2012), esto es: sus planicies aluviales. Luego, al menos ha de variar la configuración de la exposición de bienes, servicios y población a los repuntes de nivel hidrométrico que pudieran ocurrir en la red fluvial, en respuesta a las lluvias. Y posiblemente, superando algún umbral de cambio en la exposición, pueda advertirse una variación significativa en la estructura temporal o espacial de las inundaciones ribereñas. A la vez, la impermeabilización de superficies, así como la compactación de suelos, suelen llevar a pérdidas en las tasas de infiltración, posibilitando una mayor generación de escorrentía a mismas condiciones de humedad antecedente para una lluvia en particular, tanto como la consecuente disminución de la rugosidad del terreno conduce a velocidades de traslado notoriamente superiores. La combinación tiene por efecto una aceleración del tiempo al pico, como un empuntamiento de este (Hollis, 1975; Tucci, 2005). Esto es notorio cuando se urbaniza la superficie total de un sistema hídrico y ha sido objeto de atención de la Hidrología Urbana desde hace mucho tiempo (Hollis, 1975; Tucci, 2005). Por tanto, bien puede forzar la variación de la estructura temporal de la amenaza (Vogel, 2011) y así, de la inundación (planteando *ceteris paribus* sobre la estructura de ocupación del territorio).

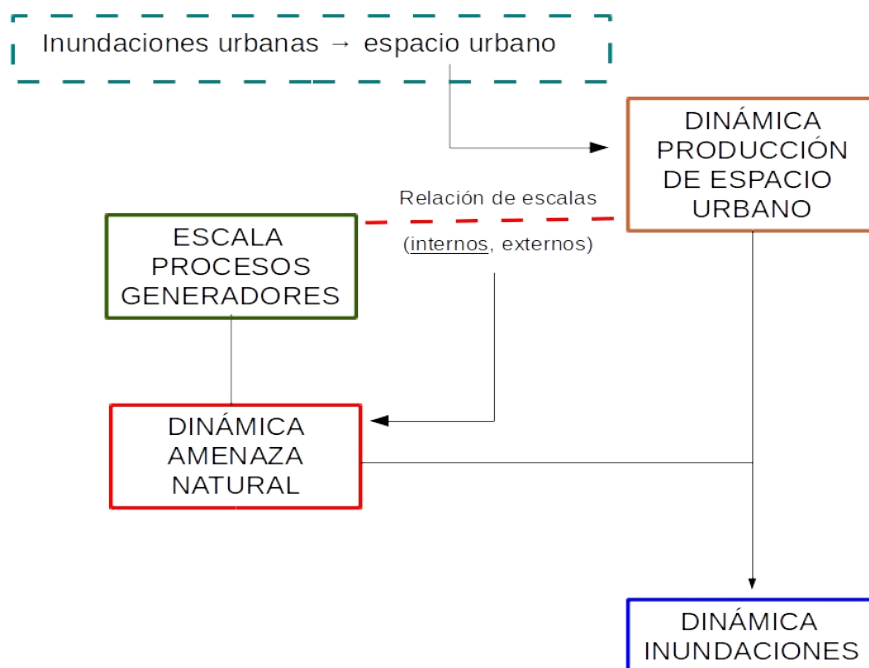


Figura 1. Componentes en la dinámica de las inundaciones ribereñas urbanas

En segundo lugar, la ocurrencia de una inundación conduce a una perturbación sobre las funciones de los distintos componentes del sistema territorial (Minciardi et al., 2006; ; Pascale et al., 2009). En consecuencia, es muy probable que ocurran cambios en el sistema territorial una vez identificada la amenaza. Por ejemplo,

en búsqueda de una organización territorial que minimice el daño en el modo de producción económico sobre el cual se apoya. Efectivamente, la aplicación de medidas estructurales (e.g. obras de defensa, desvío y contención) generalmente está orientada a la disminución del daño sobre una forma pre-existente de ocupar el territorio (Kundzewicz, 2001; Takeuchi, 2001). Pongamos por caso, mediante la atenuación de repuntes (i.e. modificando la estructura temporal y espacial de la amenaza) o mediante la virtual exclusión de la exposición, brindada por 'las defensas'. Esto último ha sido fuertemente analizado en una serie de trabajos locales, identificando claramente aspectos superestructurales modificados – i.e. 'invisibilización de la amenaza' (González, 2006) – cuyos efectos legitiman la producción de espacio geográfico que da lugar, e inclusive intensifica, a la ocurrencia del desastre (González, 2006; Viandt y González, 2012, entre otros).

En suma, la inundación es un fenómeno emergente dentro de un sistema territorial, caracterizada por cierta recurrencia que bien puede variar en espacio y tiempo. La misma surge de la interacción propia entre medio físico y medio social en la producción de espacio geográfico. Por tanto, el estudio de su dinámica implica el análisis de dos componentes (tanto como su interacción): la dinámica de una amenaza hídrica y la dinámica de localización (y estructura interna) de las actividades económicas, los servicios y la población – i.e. ocupación del territorio -. De ahí que frecuencia de inundación no sea necesariamente sinónimo de frecuencia de amenaza, pues se incurre en omitir la dinámica social. Asimismo en esta interacción también es necesario identificar la escala de los procesos que regulan ambas dinámicas. Pues no necesariamente han de coincidir.

METODOLOGÍA

Definición del problema de investigación e hipótesis involucradas.

Nuestro interés está centrado en las inundaciones originadas a partir de los desbordes de los ríos y arroyos en tramos urbanos, conocidas en la literatura hidrológica como inundaciones urbanas ribereñas (Tucci, 2005; Bertoni, 2004). Y particularmente en aquellas que los procesos generadores de la amenaza exceden la escala urbana (i.e. *externos*, de acuerdo ala Fig. 1). Esto es, inundaciones urbanas asociadas a desbordes productos de un excedente hídrico generado en un área mayor a la del sistema urbano considerado. Específicamente, es de nuestro interés el caso de las crecidas del río Luján, en el tramo que recorre la localidad homónima y alrededores.

Así, partimos de la asunción que la frecuencia de inundación por crecida ribereña se ha incrementado en los últimos años, particularmente para el caso de algunos asentamientos urbanos situados sobre la planicie

chaco-pampeana, emplazados en el noreste de la provincia de Buenos Aires (i.e. en el último lustro para el caso de Luján, sobre la base de los eventos registrados en 2012, 2014 y 2015). Esta hipótesis forma parte de un marco teórico consensuado tanto por académicos como por tomadores de decisión, ampliamente difundido por los medios masivos de comunicación. En este sentido referimos al lector a las declaraciones manifestadas en los periódicos nacionales y locales, tanto por referentes sociales como por miembros de la comunidad científico-tecnológica, durante las inundaciones pampeanas de agosto de 2015, que afectaron a un importante número de asentamientos urbanos localizados tanto en la Pampa Deprimida (i.e. planicie del Salado) como en la Pampa Ondulada (i.e. ríos Arrecifes, Areco, del Medio, Luján, Saladillo, entre muchos). Por tanto, en primera instancia, haremos a un lado el ejercicio crítico sobre este postulado, avanzando sí en el contraste de las hipótesis ensayadas sobre los factores causales.

Suele asumirse que el incremento en la periodicidad de la inundación se debe, principalmente, a cambios en la estructura temporal de la amenaza. Más aun, las posiciones más difundidas apoyan esta afirmación sobre la base de dos factores principales: (a) cambios significativos en el régimen de precipitación (i.e. tendencia positiva en los montos acumulados) o (b) prácticas de manejo inadecuadas (i.e. alteración del balance hídrico y la propagación del excedente por cambios en la cobertura del suelos o instalación de obras civiles). En principio, dado el carácter fuertemente subjetivo de la inundación, centrar las explicaciones causales en torno a la amenaza podría estar dejando de lado una proporción importante de información sobre las características del problema y, por tanto, reproduciendo un conocimiento inacabado que estimulara la reiteración del desastre. Este es nuestro *leitmotiv* de investigación.

Luego, si se equipara la frecuencia de la inundación con la correspondiente a la amenaza, es conveniente partir del análisis de la estructura temporal de esta. En otras palabras, si se sostiene que el incremento en inundaciones es producto de una mayor frecuencia de picos por encima de un umbral crítico de nivel hidrométrico - debido a cambios en la distribución de precipitaciones o alteración de los componentes del sistema hídrico (i.e. capacidad de amortiguación) -, es menester poner a prueba la hipótesis sobre la estacionariedad en la dinámica de la amenaza. Y esto no ha sido un ejercicio común, al menos dentro de la literatura hidrológica argentina. Muy posiblemente vinculado a la escasez de registros. Así, en primer lugar proponemos un análisis estadístico de las series de precipitación y nivel hidrométrico disponibles, a fin de identificar cambios en los regímenes.

Por otro lado, el umbral crítico de nivel hidrométrico no es un parámetro estático de un sistema territorial. Dicho de otro modo, el establecimiento de un valor de nivel crítico, en una sección fluvial o a lo largo de un tramo urbano, dependerá de la disposición del asentamiento en relación a las crecidas de un río. Los niveles

de alerta y evacuación varían de acuerdo al desarrollo urbano presente. Por ejemplo, resulta por demás intuitivo pensar que tanto más próximo al cauce se encuentre asentada la población tanto menor serán los niveles de alerta y evacuación. De ahí, que *a priori* nos resulte una simplificación grosera, al menos sin el consecuente ejercicio crítico (e.g. mostrar que no han variado los niveles umbrales críticos), las aproximaciones que equiparan frecuencia de inundación con frecuencia de amenaza. Luego, resulta apropiado estudiar los cambios en la exposición a la amenaza que bien podrían haberse producido debido al proceso de expansión urbana que pudo haber acompañado el crecimiento urbano.

En fin, considerando estos aspectos y centrándonos en el caso de sistemas fluviales cuya extensión espacial excede por mucho la escala urbana (i.e. dinámica de la amenaza regulada por procesos externos al asentamiento), nuestra hipótesis alternativa es que el incremento en la frecuencia de las inundaciones urbanas ribereñas pampeanas se debe más en cambios en la configuración de la propia geografía urbana más que cambios drásticos en el régimen hidrológico. En este sentido, nos resulta interesante indagar si los pulsos de urbanización se han asociado a oscilaciones cíclicas en el almacenamiento y la generación de excedente hídrico en los sistemas hídricos pampeanos.

Área de estudio y métodos seleccionados

El presente análisis se ha centrado en la estructura temporal de la precipitación y del nivel hidrométrico en la cuenca vertiente al río Luján, particularmente en el área de aportes hídricos a su tramo superior y medio, explorando las relaciones posibles con el proceso de producción de espacio urbano. Para esto, en primer lugar, hemos definido la extensión del sistema hidrológico estableciendo su cierre en la sección transversal correspondiente al puente de la localidad de Jaúregui - Pueblo Nuevo (Fig. 2). Luego, hemos procedido a evaluar la existencia de patrones en series de precipitación y de nivel hidrométrico. En segunda instancia, hemos intentado identificar las variaciones en la disposición de distintos asentamientos urbanos al respecto del sistema cauce-planicie aluvial, haciendo eje en el tramo definido entre las rutas provinciales N° 42 y N° 6, el cual posee una longitud próxima a 51 km y cuya urbanización primeramente se supuso en aceleración, durante los últimos 20 años.

Para el desarrollo de lo primero nos hemos apoyado en el uso de métodos de estadística exploratoria a fin de detectar patrones o descartar la existencia de estos en las señales utilizadas (i.e. precipitación, nivel hidrométrico, caudal). Así, hemos estudiado las series de máximos anuales de precipitación acumulada diaria, semanal y quincenal, así como la serie de anomalías mensuales de precipitación y la serie de máximos anuales de nivel hidrométrico diario. También hemos analizado el acumulado de anomalías mensuales el cual suponemos asociado a las variaciones en la posición del nivel freático, factor crítico en la

generación de escorrentía en sistemas hídricos de llanuras con clima húmedo (Kruse y Zimmermann, 2000). A la vez, nos hemos valido de la modelación matemática del proceso de transformación de lluvia en escorrentía como instrumento para evaluar la hipótesis de posibles efectos en el régimen hidrológico debido a alteraciones del régimen de precipitaciones, bajo suposición que los procesos internos del sistema natural no han variado significativamente. Particularmente hemos recurrido al uso de modelos hidrológicos agregados a nivel cuenca vertiente, a paso diario. Los esquemas que se han utilizado han sido el Sacramento Modificado con parámetro de área efectiva – SacMod/ae - (Bianchi y Sánchez Caro, 2014) y el HIDROSAT (Giordano, 2014). La relación nivel hidrométrico – caudal utilizada para la evaluación de la eficiencia de estos modelos, en dominio de caudal, ha sido la elaborada por Sanchez caro y Bianchi (2014). Por otro lado, hemos comparado los resultados obtenidos mediante modelación hidrológica con los escasos registros limnimétricos de las últimas crecidas importantes (2012, 2014 y 2015), a fin de evaluar la pertinencia de la asunción adoptada (i.e. parámetros del proceso de transformación de lluvia en caudal sin alterar). En cuanto al análisis de producción de espacio urbano, nos hemos centrado en los cambios posibles en términos de exposición, en el tramo mencionado. En otras palabras, hemos limitado el alcance del análisis a la 'capa externa' de la vulnerabilidad (Bohle, 2001) del sistema territorial desarrollado en torno al tramo considerado.

La Fig. 2 muestra la situación geográfica del área de estudio y los sitios correspondientes a las mediciones pluviométricas e hidrométricas utilizadas, tanto como del tramo donde se han centrado las observaciones de producción de espacio urbano. A su vez, la tabla I presenta las principales características físicas del sistema hídrico analizado, con valores típicos correspondientes a un sistema de llanura, tanto como la longitud de las series de mediciones disponibles para el análisis. En cuanto a la elección de la sección de Jaúregui-Pueblo Nuevo podríamos afirmar que obedece a tres motivos. Primeramente, las últimas crecidas del río Luján han dado lugar a una serie de inundaciones que han sensibilizado mucho a la población, transformándose en un área relevante en tanto y cuanto la discusión en torno al fenómeno. Asimismo, como hemos mencionado, es de nuestro interés la interacción del hombre con las crecidas ribereñas en tramos urbanos de ríos de llanura. Y, en especial de aquellas que presentan forzantes que operan a una escala espacial mucho mayor que la del desarrollo urbano involucrado. De hecho, *in strictu sensu* una crecida ribereña suele guardar estas características, pues si el área de aportes se encuentra mayormente urbanizada el problema suele estudiarse a partir de deficiencias en el sistema de drenaje urbano (Tucci, 2005; Bertoni, 2004). En segundo lugar, en la sección Jaúregui-Pueblo Nuevo se dispone de una serie (discontinua) de registros limnimétricos, así como de relación nivel hidrométrico – descarga (necesaria para la calibración de modelos hidrológicos). Por último, el caudal que atraviesa dicha sección constituye el aporte principal al tramo urbano que surca la ciudad de Luján y, por tanto, es un predictor del nivel hidrométrico en este. Y además, sobre el tramo definido entre la ruta N° 42 y N° 6 se emplazan asentamientos que han evidenciado un fuerte proceso de urbanización durante los últimos 20 años, cobrando relevancia la dinámica de producción de espacio en relación a lo ya mencionado al respecto de niveles críticos.

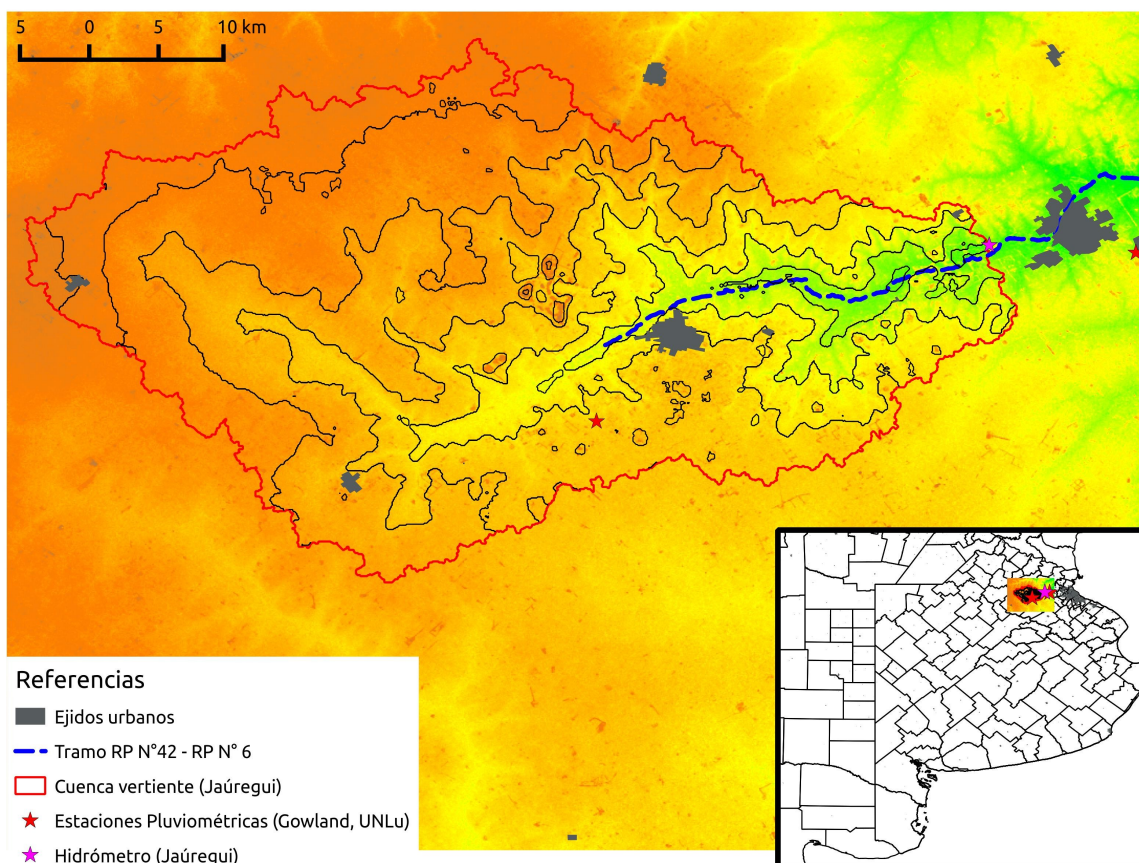


Figura 2. Situación geográfica de la cuenca vertiente al río Luján en Jaúregui, estaciones pluviométricas e hidrométricas con registros confiables y del tramo de río definido entre las rutas provinciales N° 42 y N° 6 y de pluviómetros y escalas limnimétricas utilizadas para el análisis. La imagen de fondo corresponde a un modelo digital de elevaciones siendo los tonos verdes los correspondientes a menores cotas y los naranjas a mayores. Las curvas de nivel han sido extraídas con equidistancia fijada en 5 m. Elaboración propia sobre la base de datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Google-Earth

Tabla I. Principales características físicas de la cuenca vertiente al río Luján en Jaúregui, mediciones confiables disponibles y longitud de las series

Atributo	Valor
Área drenada	~ 1997 km ²
Pendiente topográfica media (interfluvios)	1 m/km
Pendiente topográfica media del cauce	0.4 m/km – 0.8 m/km
Caudal módulo (caudal específico)	12 m ³ /s (6 l.km ⁻² /s)
Precipitación Media Areal Promedio	1012 mm
Escorrentía Media anual	~ 0.2
Medición	Intervalo
Precipitación en Gowland, Mercedes, BA	1982-05-01 / 2014-12-31
Precipitación en UNLu, Luján, BA	1989-01-01 / 2014-03-14
Nivel Hidrométrico en Jaúregui-Pueblo Nuevo	1988-06-09 / 2005-08-12

Las series de datos pluviométricos confiables corresponden a las estaciones de Gowland, Ministerio de

Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires, y de la Universidad Nacional de Luján (UNLu), cubriendo completamente el período 1983-2014. Por otro lado, se dispone de una serie discontinua de lecturas limnimétricas correspondientes a la escala situada en la sección de Jaúregui, registrados durante el período 1989 – 2005. Esto último motivó que se seleccionaran únicamente los máximos correspondientes a años con 280 o más mediciones, excluyendo algunos de dicho análisis exploratorio. Finalmente, el análisis de exposición se llevó adelante mediante la inspección visual de información provista por la plataforma Google Earth.

RESULTADOS OBTENIDOS

Estructura de la amenaza

Una crecida ribereña, en un sistema hídrico de llanura, se *dispara* mediante la combinación de dos factores: la entrada de agua al sistema en forma de precipitación (forzante) y el contenido de humedad antecedente almacenado en los distintos reservorios del sistema (e.g. depresiones superficiales, suelo, subsuelo y sistema cauce-planicie). Claramente, mientras mayor sea el volumen precipitado durante el desarrollo de la tormenta, menos influencia tendrá el almacenamiento inicial. De ahí, que primeramente analicemos la estructura de los máximos de precipitación acumulada, a distintos intervalos de tiempo. La Fig. 3 muestra series de máximos anuales de precipitación acumulada diaria, semanal y quincenal, de arriba a abajo, para la estación de Gowland (izquierda) y la estación de UNLu (derecha). En principio, el supuesto de aleatoriedad (independencia estadística) no pareciera alterarse en las series observadas. Al mismo tiempo, todas las series presentan valores $p > 0.1$ para el test Breusch-Pagan de homocedasticidad en la varianza. Luego, no hay evidencia empírica que muestre grandes cambios en la dispersión de las variables analizadas.

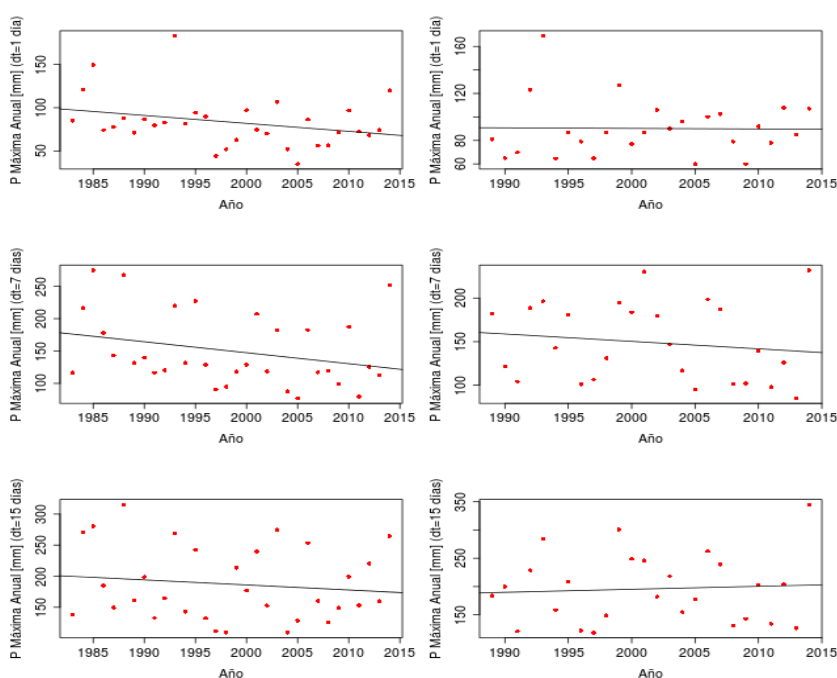


Figura 3. Series de máximos anuales de precipitación diaria de Gowland (izquierda) y UNLu (derecha)

Por otro lado, ninguna de las pendientes tampoco resulta significativa a niveles inferiores al 10% (i.e.: $p \geq 0.1$). Por tanto, no hay evidencia empírica que permita el rechazo de la estacionariedad simple en el valor esperado de los máximos anuales. Así, en una primera aproximación no se advierten signos de cambio en la principal forzante, en términos del valor medio y su dispersión, exhibiendo un patrón netamente aleatorio. En consecuencia, los eventos de precipitación de alto impacto no habrían presentado variaciones significativas, en términos de volumen, al menos durante el intervalo 1983-2014. La Fig. 4 muestra las gráficas de anomalías mensuales para la precipitación acumulada en la estación de Gowland (diferencia entre el valor acumulado mensual y el valor medio correspondiente a ese mes para el período 1982/05 – 2014/12) y de anomalía acumulada (integración de la precedente). Esta última gráfica nos ha ayudado a identificar un período de notorio predominio de valores deficitarios (i.e. por debajo del valor medio), entre 2005 y 2012, momento a partir del cual comienzan a predominar nuevamente las anomalías positivas. En efecto, el predominio de las anomalías negativas es tan evidente que la integral adopta valores también negativos (i.e. no sólo suele haber más anomalías negativas, sino que a la vez son tanto más intensas que las positivas). Este predominio de valores anómalos negativos bien puede asociarse a períodos con tendencia al incremento del consumo de las reservas de humedad en el sistema, a fin de satisfacer las demandas de la vegetación (transpiración) y atmosféricas (evaporación). En consecuencia, el déficit hídrico de los distintos reservorios ha de haberse incrementado y, de ahí, también la capacidad de amortiguación a los eventos de precipitación. Luego, podría interpretarse que el intervalo 2005-2012 corresponde a una fase seca, aspecto saliente de la variabilidad inter-anual característica de los sistemas pampeanos, citada en numerosos trabajos y habiendo sido ya advertida por F. Ameghino hace más de un siglo (Ameghino, 1884).

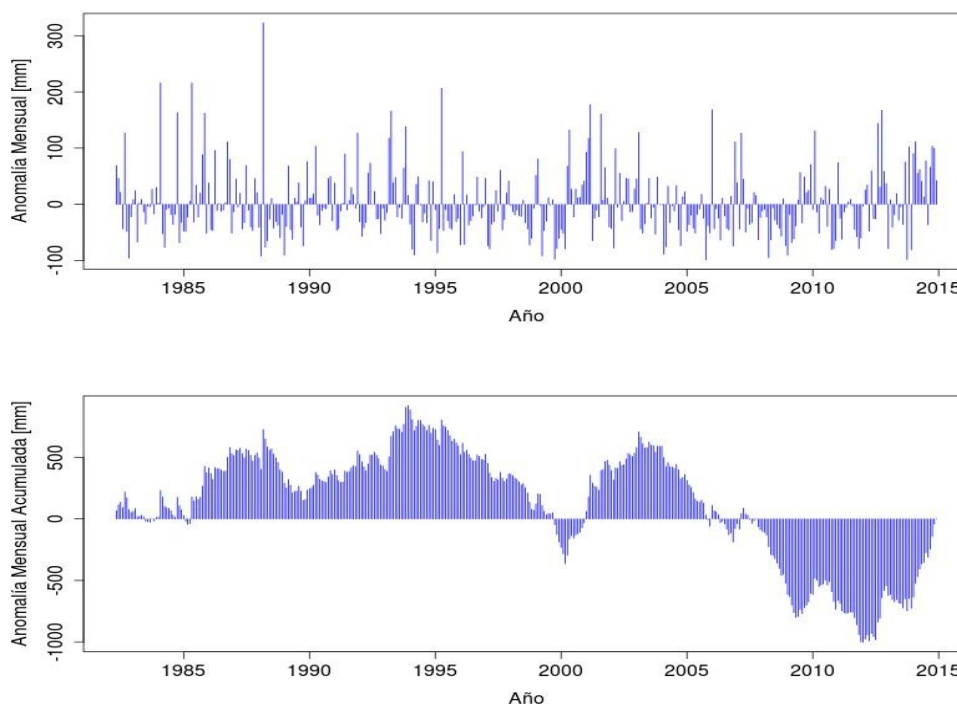


Figura 4. Serie de anomalía mensual de precipitación acumulada (arriba) e integral correspondiente (abajo). Nótese el predominio, en cantidad e intensidad, de las anomalías negativas desde 2005 hasta mediados de 2012, momento a partir del cual predominan las anomalías positivas y, de ahí, el inicio de un período francamente más húmedo que el precedente

La serie de máximos anuales de nivel hidrométrico tampoco evidencia pendiente significativa, al menos durante el período 1988 – 2003, el cual cuenta con densidad de datos adecuada (Fig. 5). Asimismo, la escasa longitud de la serie dificulta la extrapolación de la observación. Frente a esto, hemos recurrido a la modelación hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía, a paso de cálculo diario y agregada espacialmente. Dado que la calibración y evaluación de los modelos utilizados corresponde al período 1989-2005 ($R_{\text{nash-surcliffe}}$ próximo a 0.6 para ambos modelos), el experimento permite contrastar la hipótesis de cambios en el régimen hidrológico debidos únicamente a variaciones en la forzante natural (precipitaciones). Esto es, al fijar los parámetros con información procedente del intervalo 1989-2005, se asume ausencia de cambios significativos en la estructura interna del sistema hídrico (componentes de balance hídrico y de propagación de excedente hídrico) luego de 2005. Bajo esta suposición, los resultados obtenidos mediante modelación hidrológica no muestran giros significativos, al menos en un solo sentido, dentro del régimen hidrológico (Fig. 5). Sí, por otro lado, es apreciable un período de escasa actividad hidrológica (i.e. estiajes prolongados, repuntes poco significativos) durante los años 2005 a 2012, aspecto vinculado a lo observado en la inspección de las anomalías mensuales de precipitación. Consecuentemente, puede detectarse una fase más húmeda iniciándose al final de este período, asociada a las últimas inundaciones registradas.

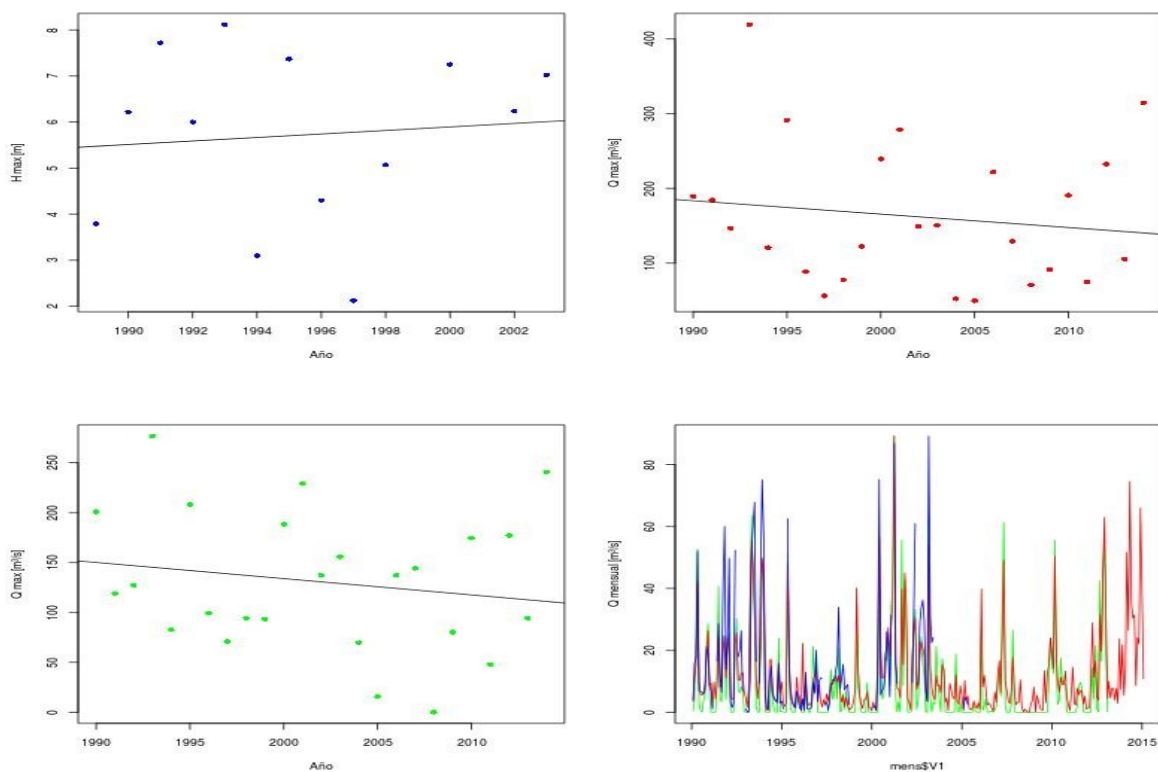


Figura 5. Series de nivel hidrométrico máximo anual observado (puntos azules), caudal máximo anual simulado mediante el modelo Sacramento Modificado (rojo) y caudal máximo anual simulado por el modelo HIDROSAT (verde). La gráfica de líneas corresponde a los valores medios mensuales de caudal observados (azul) y simulados mediante el modelo Sacramento (rojo) y el modelo HIDROSAT (verde)

En suma, los resultados no ofrecen evidencia contundente como para aceptar la hipótesis de cambio en el

régimen hidrológico, en primer lugar, debido a variaciones dentro del régimen de precipitaciones. Esto es, con las técnicas estadísticas utilizadas o haciendo uso de modelos de transformación de lluvia en escorrentía, ignorando cambios en la estructura interna del sistema (i.e. equivalente a suponer que un eventual cambio se debiera sólo a la precipitación), no hay indicios que señalen tanto cambios dentro del régimen de picos de precipitación (i.e. la periodicidad de los valores máximos anuales diarios, semanales, quincenales) como variaciones en el régimen hidrológico debidas al efecto de la precipitación. Finalmente, cabe preguntarse si es sostenible la hipótesis de ausencia de cambios en la estructura interna del sistema hidrológico. Para esto se han comparado las salidas de los modelos hidrológicos utilizados con los escasos registros disponibles para las últimas crecidas de importancia (Fig. 6). Así, inspeccionando los resultados de la modelación a paso diario, contrastando contra mediciones de nivel hidrométrico transformadas a dominio de caudal (correspondientes a la crecidas de octubre de 2012, mayo de 2014 y agosto de 2015) pudo apreciarse que el sesgo de la modelación persistía de forma semejante al observado en el período de calibración y el de verificación (1989-2005), tanto como la eficiencia era similar. Este último aspecto no brinda elementos para refutar la hipótesis de estacionariedad en los parámetros, i.e.: cambios significativos en la estructura interna del sistema hidrológico. En otras palabras, dado que la simulación es satisfactoria y no es posible detectar tendencia alguna en los errores de modelación, no resulta posible refutar la validez de los parámetros fijados utilizando información de 1989 – 2005, para el período 2005 – 2015. Y esto equivale a asumir que su valor es constante, i.e.: no es necesario suponer cambios significativos en la estructura interna del sistema hídrico, al menos al nivel de agregación espacial llevado adelante en este análisis (cuenca vertiente del río Luján en Jaúregui), para explicar aquello que ha sucedido durante los últimos 4 años. O lo que es lo mismo, los factores no considerados en la modelación no necesariamente han variado sensiblemente, al nivel de agregación considerado.

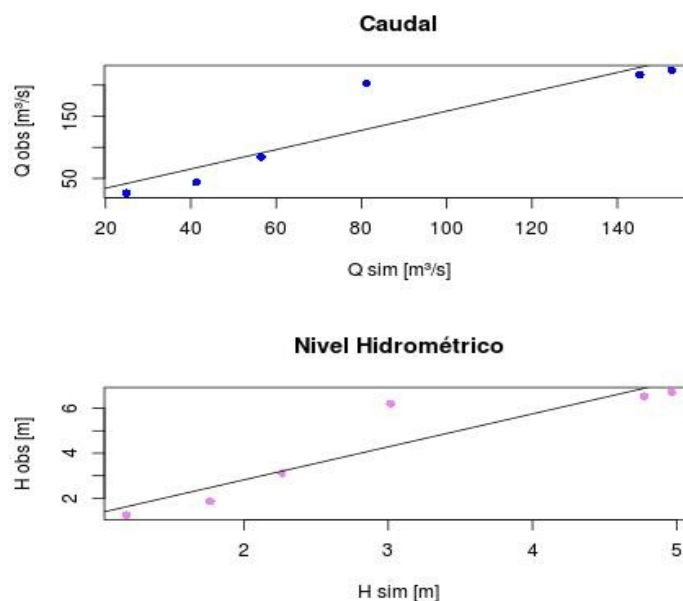


Figura 6. Arriba: caudales simulados (modelo Sacramento Modificado) y registrados (H-Q) del río Luján en su sección de Jaúregui, durante la crecida de mayo de 2014 ($R^2 \sim 0.83$, $RMSE = 36.5 \text{ m}^3/\text{s}$). Niveles Hidrométricos simulados (Q-H) y observados en mismo período ($R^2 \sim 0.84$, $RMSE = 1 \text{ m}$)

Análisis de exposición

La inspección visual de la información provista por la plataforma Google-Earth permite advertir un acelerado proceso de expansión urbana sobre las márgenes del tramo analizado del río Luján, acompañado por densificación en las áreas previamente urbanizadas, sobre todo en las proximidades de la ciudad homónima. La densificación se realiza, en gran medida, sobre la planicie aluvial (Fig. 7, área entre líneas rojas). A la vez, la expansión tiene por efecto inmediato la localización de población y actividades económicas en cotas asociadas un valor mayor de permanencia de nivel hidrométrico (excedencia). Ergo, se produce una ingesta de sesgo positivo en la frecuencia de registros de inundación por incremento en la exposición. En otras palabras, se construye riesgo hídrico. Así puesto, la producción actual de espacio urbano es un factor inflacionario de la dinámica de registros del desastre.

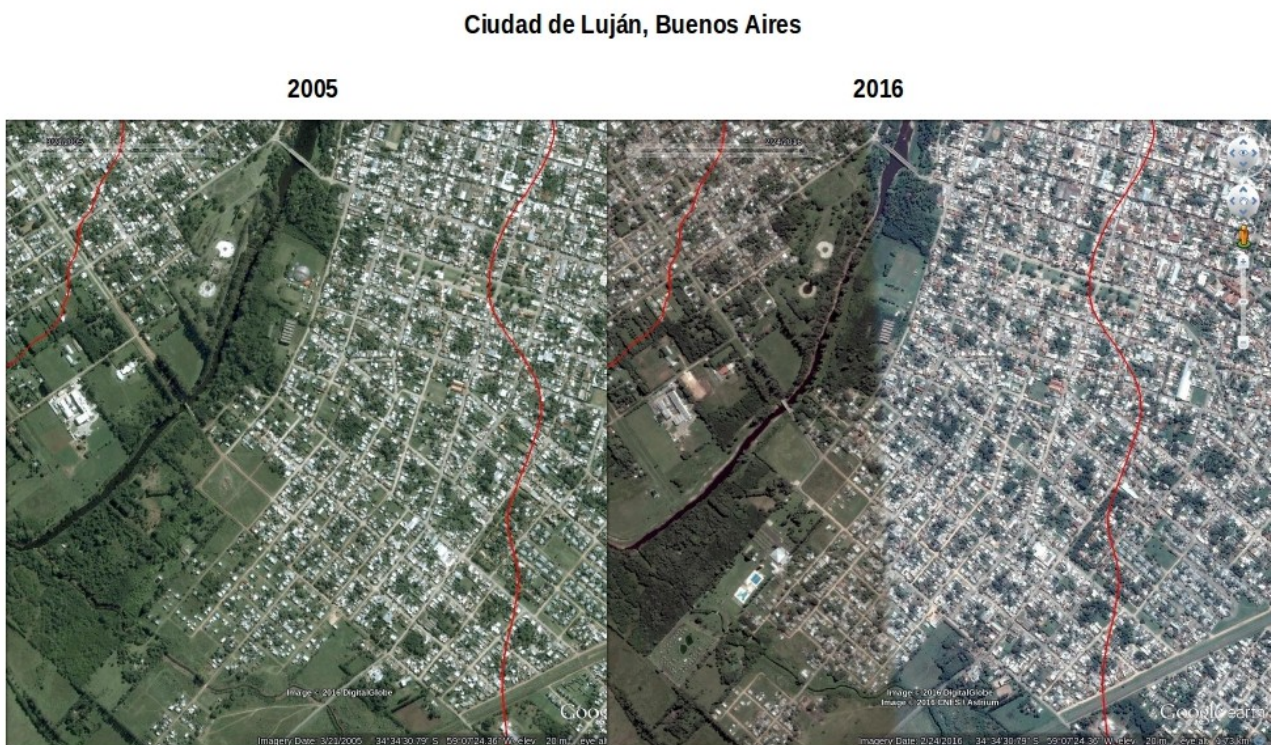


Figura 7. Expansión urbana sobre las márgenes del río Luján en la ciudad homónima y densificación sobre planicie aluvial (área entre líneas rojas correspondiente a una crecida con período de retorno $T=100$ años, Brea et al., 2007) observada a partir de información Google-Earth

Para el caso de pequeñas aglomeraciones lindantes a la ciudad de Luján, la expansión urbana hacia el cauce ha sido notoria, asociada al fuerte proceso de urbanización que en los últimos años experimentó la región. El caso de Olivera es ejemplar: el área actualmente cubierta por residencias sobre la planicie aluvial duplica la correspondiente a 2005 y se produjo un avance de, al menos, 235 m hacia el cauce, situándose el frente urbano en las proximidades del nivel de banca del tramo local del río Luján (Fig. 8,). Nuevamente, este factor debe considerarse en el análisis de la frecuencia de inundaciones.



Figura 8. Expansión urbana sobre las márgenes del río Luján en Olivera y densificación sobre planicie aluvial (área entre el cauce y la línea roja, correspondiente a una crecida con período de retorno $T=100$ años, Brea et al., 2007) observada a partir de información Google-Earth

DISCUSIÓN

Hemos mostrado que la frecuencia de inundación depende tanto de la dinámica de las crecidas ribereñas como de la dinámica de producción de espacio. Luego, nos hemos preguntado si el eventual incremento en la periodicidad del fenómeno podría responder en mayor medida a lo último que a lo primero. Pues, por regla general los discursos dominantes se apoyan en la hipótesis de cambios en la estructura temporal de la amenaza. Ya sea por variaciones significativas en el régimen de la principal forzante de una crecida ribereña (i.e. precipitación) o por el efecto amplificador, sobre la generación de escorrentía, que bien pudieran tener las actuales prácticas culturales en relación a las pre-existentes. En consecuencia, hemos sometido a contraste elementos presentes en la formulación de estos discursos postulando, a la vez, la hipótesis alternativa, tomando por caso las inundaciones del río Luján en el tramo definido entre las rutas provinciales N° 42 y N° 6 .

Así, en primer lugar, hemos podido observar que en términos de volumen de agua precipitado no ha habido variaciones significativas para los máximos anuales acumulados en un día, una semana o una quincena. Por tanto, en caso de haber cambios significativos deberían presentarse a otro nivel de agregación (e.g. las funciones de distribución de la lámina acumulada dentro del día, la semana o la quincena). Y, aún así, para un

sistema hídrico de las dimensiones de la cuenca vertiente al río Luján en Jaúregui, dado que las grandes crecidas ribereñas dependen más del volumen acumulado que de las máximas intensidades puntuales, posiblemente no se aporte mayor información siguiendo dicha línea. Entonces, la hipótesis de giros en el régimen hidrológico debidos a cambios en la principal forzante de las crecidas, al menos en un sentido, pierde fuerza. Posiblemente, la hipótesis de cambio en un sentido (i.e. inflación) surja a partir de un análisis centrado en un período demasiado corto, despreciando la variabilidad natural y capturando una falsa tendencia. También quizás, en un escenario de ausencia de registros (i.e. escasa accesibilidad o difusión) la memoria colectiva se estructure de acuerdo al pasado inmediato. Así, por ejemplo, al observarse únicamente los registros de precipitación correspondientes al período 2005-2015 podría detectarse una tendencia positiva. Sin embargo, hay elementos que señalan a este incremento como propio de una fase húmeda dentro de un comportamiento cíclico: la tendencia se captura pues se observa un ascenso, mas el mismo es en el marco de un comportamiento cuasi-periódico que intercala secuencias de años húmedos y secos, mediados por la normalidad. Luego, puede resultar precipitada la aseveración en un sólo sentido y no hay elementos empíricos que permitan sostenerla una vez extendida la serie analizada.

Por otro lado, no hemos podido identificar elementos que señalen variaciones significativas en la distribución de los valores máximos anuales de nivel hidrométrico. A la vez, el hecho que los modelos hidrológicos mantengan un buen y similar desempeño por fuera del intervalo de calibración, inclusive de 2005 en adelante, sugiere que aquellos factores no considerados (i.e. los que hacen al error) no han variado significativamente o, mejor dicho, que su efecto combinado al nivel de agregación espacial considerado (cuenca vertiente $\sim 2000 \text{ km}^2$) ha permanecido estacionario. Esto último atenta contra la postura de 'amplificación' por cambios de prácticas culturales, al menos formulada para explicar aquello que ocurre sobre el tramo del río considerado, tomando como referencia el nivel hidrométrico del río Luján en Jaúregui. Los cambios de prácticas pueden tener un efecto notorio sobre los coeficientes de escorrentía a nivel de parcela, a mismas condiciones iniciales (e.g. contenido de humedad almacenado en la superficie y en el suelo, i.e. estado del sistema) y de borde (e.g. posición freática). Sin embargo, esto no necesariamente conduce a un cambio significativo sobre la forma de un hidrograma en una sección del río. Inclusive, si la cuenca vertiente es extensa habría que evaluar si la atenuación por almacenamiento y traslado es tal que los cambios en la producción de excedente hídrico, debidos a distintas prácticas culturales, no resultan significativos en la estructura del nivel hidrométrico en la sección fluvial estudiada (i.e. la distribución de picos no varía sensiblemente). Cabe recordar, en una visión espacialmente agregada del problema, que una cuenca vertiente actúa como *filtro integrador* de un hietograma, 'suavizándolo' y produciendo un hidrograma. En jerga de modelística, debiéramos preguntarnos y observar cuál es el límite de variación de los parámetros del sistema físico como para producir hidrogramas sensiblemente distintos, en escenarios similares. Específicamente, debiéramos evaluar si hay efecto significativo, al menos, en los valores de picos de nivel hidrométrico y las permanencias. Al respecto, en el análisis de picos de nivel hidrométrico en Jaúregui no hemos podido detectar variaciones significativas. En resumen, sobre la base de los resultados obtenidos

utilizando esquemas simples de transformación lluvia-escorrentía hemos notado que (a) bien puede resumirse gran parte de la información observada sin suponer cambios en los parámetros de los modelos, luego de 2005 (b) pudiendo postularse que no ha habido cambio en el efecto combinado de los factores no considerados en la modelación y (c) la actividad del sistema oscila cuasi-periódicamente presentando fases húmedas y secas, habiéndose constatado un período de escasa actividad hidrológica durante los años 2005 – 2012 y una fuerte recarga y generación de excedentes, coincidentes con lluvias por encima de lo normal, desde 2012 a 2015.

Por último, la simple inspección visual permite apreciar un ininterrumpido proceso de expansión urbana hacia el cauce y densificación sobre la planicie aluvial, en el tramo analizado del río Luján. Lógicamente, este patrón está vinculado al intenso proceso de periurbanización del Área Metropolitana de Buenos Aires. El efecto directo es un incremento en la dimensión de exposición. Y esto infla el registro de inundaciones. Al menos por dos vías. La aproximación al cauce puede significar tomar contacto con las crecidas y, cada vez, con aquellas de picos inferiores. Ya sea por 'estar en un sitio donde el río crece y antes no se estaba' tanto como por 'estar en un sitio en el que es más frecuente la crecida', lo cual no requiere de cambios en la estructura temporal de la amenaza para que se produzca un incremento en la frecuencia del fenómeno de inundación. Inclusive, nos ha intrigado el hecho que gran parte de este proceso se haya intensificado durante el último período de escasa actividad hidrológica del río Luján (2005-2012). Así, sostenemos, la expansión es tanto más fuerte cuando la amenaza se invisibiliza. Y cuando esta retorna, *se la descubre*. Y quizás por eso se aprecia como novedoso lo que no lo es y se deja de lado lo que realmente sí lo es: 'antes ahí no había ciudad'. Finalmente, cabe preguntarse si esta 'lógica de la novedad' centrada en la amenaza no conduce a un conjunto de acciones sobre el territorio que garantiza la reproducción del desastre. Pues al clausurar la crítica sobre cómo se *posicionan* las partes interesadas frente al peligro de una crecida ribereña (e.g. mediante el recurrente paquete de medidas estructurales como terraplenes, canales y defensas, aspecto retro-alimentado mediante una fuerte/consecuente implantación en la demanda ciudadana) se legitima el modo de producción territorial que ha conducido a una mayor exposición, tanto como también se generan externalidades no contempladas. Y quizás deba reflexionarse más sobre esto último.

BIBLIOGRAFÍA

Ameghino, F. 1984 [1884]. *Las secas y las inundaciones en la Provincia de Buenos Aires. Obras de retención y no de desagüe*. Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires. La Plata, Argentina.

Bertoni, J.C. (Dir.). 2006. *Inundaciones urbanas en Argentina*. Editorial Científica Univeristaria. Córdoba, Argentina.

Bianchi, J. F. y Sanchez Caro, A. 2014. Modelación hidrológica a paso diario de la cuenca del río Luján, Provincia de Buenos Aires. *Actas 2° Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos (IFRH 2014)*. Ezeiza, Argentina.

- Brea, J. D., Reyna, J. y Spalletti, P., 2007. Diagnóstico del funcionamiento hidrológico hidráulico de la cuenca del río Luján, Provincia de Buenos Aires. Delimitación de las zonas bajo riesgo hídrico. Laboratorio de Hidráulica aplicada. Instituto Nacional del Agua. Argentina.
- Di Pace, M. y Barsky, A. (Dirs.). 2012. *Agua y territorio*. UNGS – Ciccus. Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina.
- Douben, K. J. 2006. Characteristics of river floods and flooding: a global overview, 1985-2003. *Irrig. and Drain.* 55: S9–S21. John Wiley & Sons. Estados Unidos de Norte América.
- Giordano, L. 2014. Elaboración, calibración y verificación de un modelo hidrológico, agregado y continuo, sobre la base de información hidrológica provista mediante Teledetección. *Actas Congreso Internacional de Hidrología de Grandes Llanuras*. Santa Fe, Argentina.
- González, S. 2006. O planejamento urbano e a construção do risco por inundações na cidade de Buenos Aires. En A. F. Alessandri Carlos y A. U. de Oliveira (org.), *Geografias das Metrôpoles*. Editora Contexto. San Pablo, Brasil.
- Hollis, G.E. 1975. The Effect of Urbanization on Floods of Different Recurrence Interval. *Water Resources Research*, Vol. 11 N° 3. American Geophysical Union. Estados Unidos de Norte América.
- Kruse E. y Zimmermann, E., 2002. Hidrogeología de Grandes Llanuras: particularidades en la Llanura Pampeana (Argentina). *Groundwater and Human Development* (IAHS Congress). Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina
- Kundzewicz, Z. 2001. Non-structural Flood Protection and Sustainability. En *Non-structural measures for water* Simonovic, Slodoban (Ed.) *Non structural measures for water management problems (Technical Documents in Hydrology No. 56)*. PHI-UNESCO. Francia.
- Lindón, Alicia, 1989. La problemática de las inundaciones en áreas urbanas como proceso de ocupación, un enfoque espacio-temporal. El caso de la ciudad de Buenos Aires. *Actas Encuentro de geógrafos de América Latina*. Montevideo, Uruguay.
- Minciardi, R. Sacile, R., Taramasso, A. C., Trasforini, E. y Traverso, S. 2006. Modeling the vulnerability of complex territorial systems: an application to hydrological risk. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 21 N°7. Elsevier. Amsterdam, Países Bajos.
- Pascale, S., Giosa, L., Sdao, F. y Sole, A. 2009. Assessment of systemic vulnerability in flood prone areas. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol 120. Reino Unido.
- Ríos, D. y González, S. 2011. Una aproximación a las relaciones entre espacio urbano y riesgo de desastres. Dos casos de estudio para el centro y la periferia inundable del Aglomerado Gran Buenos Aires. *Espaço e Tempo* (GEOUSP), N° 29. San Pablo, Brasil.
- Takeuchi, W. Flood Management in Japan - From Rivers To Basin. En *Non-structural measures for water* Simonovic, Slodoban (Ed.) *Non structural measures for water management problems (Technical Documents in Hydrology No. 56)*. PHI-UNESCO. Francia.
- Tucci, C. 2005. *Gestión de inundaciones urbanas*. Global Water Partnership. Porto Alegre, Brasil
- Viant, J. Y González, S. 2012. Crear riesgo, ocultar riesgo: gestión de inundaciones y política urbana en dos ciudades argentinas. *Actas 1^{er} Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos* (IFRH 2012). Ezeiza, Argentina.