

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE
RETENCIÓN EN EL TERRITORIO DE INUNDACIONES**

Sergio Salazar y Félix Francés

*Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera S/N, Valencia, España, +034 963877612
sersaga@upvnet.upv.es , ffrances@hma.upv.es*

RESUMEN:

Las inundaciones son el desastre natural con mayor ocurrencia en el mundo y el que mayor número de personas damnificadas reporta. Disminuir la incertidumbre en el cálculo de las variables involucradas en la determinación del impacto de estos eventos sobre las vidas y bienes materiales, contribuye favorablemente en los procesos de toma de decisiones de medidas de mitigación de inundaciones. El presente trabajo compara la eficiencia de la aplicación de diferentes medidas de mitigación de inundaciones, utilizando los últimos avances científicos y técnicos en el análisis hidrológico de cuencas naturales. Dentro de la metodología propuesta, se ha aplicado el concepto de retención de agua en el territorio en una cuenca de 380 km² aproximadamente, ubicada en la zona mediterránea de España, la cual esta sometida a fenómenos meteorológicos de extraordinaria magnitud y que fue severamente inundada en los años 2000 y 2002. Se han determinado cuatro posibles escenarios futuros basados en cambios en las características de producción o de propagación de la escorrentía, es decir, cambios en el uso del suelo o escenarios de retención local, respectivamente. Los resultados en términos de la eficiencia en la reducción del caudal máximo de la inundación muestran que, para eventos con periodos de retorno bajo y medio, cambios positivos en el uso del suelo es más eficiente, mientras que para eventos con periodos de retorno altos, la adopción de un embalse como medida de retención local es la mejor medida de mitigación.

ABSTRACT:

Floods are natural disasters with the greatest frequency worldwide and cause the highest level of damage in populated zones. To reduce uncertainty in the calculation of the variables involved in determining the impact of these events on life and property, contribute positively in the decision-making process of flood mitigation measures. This paper compares the efficiency of the implementation of various flood mitigation measures, using the latest scientific and technical advances in the hydrological analysis of natural basins. Within the proposed methodology "retaining water in the landscape" concept has been applied in a basin of approximately 380 km², located in the Spanish Mediterranean area, which is prone to meteorological phenomena of extraordinary magnitude and that was severely flooded in 2000 and 2002. We have identified four possible future scenarios based on changes in the characteristics of runoff production or runoff propagation, i.e., land use changes or local retention measures, respectively. The results in terms of efficiency in reducing the maximum flood peak discharge show that, for small and medium return periods, positive land use changes improve reducing the peak flow, while for high return periods, adoption of a dam as local retention measure is the best mitigation measure.

PALABRAS CLAVES:

Inundaciones, Mitigación, Peligrosidad.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas naturales a la vez que ofrecen recursos también ofrecen peligros. La materialización de estos peligros en daños ha traído como consecuencia innumerables pérdidas humanas y económicas, debido principalmente al aumento de la vulnerabilidad por las alteraciones antrópicas del conjunto del sistema. Las inundaciones son el desastre natural con mayor ocurrencia en el mundo y el que mayor número de personas damnificadas reporta. Una revisión de las pérdidas económicas causadas por inundaciones, indican que Europa es el segundo continente con mayor impacto de este tipo después de Asia; en los últimos diez a quince años, ha presenciado un incremento dramático, debido a una marcada acentuación del número de personas y bienes económicos localizados en zonas con riesgo de inundación. En la península Ibérica las inundaciones también son el desastre natural con más impacto sobre vidas y bienes. Una de las zonas con mayor riesgo de inundación en España es la Comunidad Valenciana, ya que esta región mediterránea esta sometida a fenómenos meteorológicos de extraordinaria magnitud: tormentas convectivas de mesoescala ocurridas en el periodo otoñal (periodo donde se dan los factores necesarios para la formación de este fenómeno conocido como “Gota Fría”).

Por un lado, esta claro que el impacto de las inundaciones se debe estimar con la máxima precisión posible, como fue indicado por Francés F. (1998) y Jarrett y Tomlinson (2000), especialmente cuando este afecta núcleos poblacionales. La infravaloración del impacto de las inundaciones contribuye a que los daños sean más grandes que los esperados, pero la sobrestimación conduce a sobrediseñar las medidas de protección contra las inundaciones, elevando sus costos. Por otro lado, una gestión inadecuada del riesgo de inundaciones o la ausencia de ello, pueden llevar a la ocurrencia de pérdidas considerables de vidas y propiedades.

Las medidas de mitigación del riesgo de inundaciones pueden darse disminuyendo la vulnerabilidad y/o la peligrosidad, en el orden de disminuir el impacto total de la inundación. Tradicionalmente, en el cálculo de la peligrosidad de inundaciones se utilizan tormentas de diseño que se transforman en caudal a través de modelos agregados de lluvia escorrentía. Este enfoque pierde de vista la variabilidad espacio-temporal existente en las tormentas extremas y en las principales características hidrológicas, así como anula la posibilidad de analizar el efecto de los cambios en la cobertura del suelo dentro de la cuenca. Uno de los aspectos fundamentales en la metodología de cálculo es el análisis hidrológico. La principal herramienta científica utilizada para resolver esta tarea ha sido la modelación hidrológica que de acuerdo a la variabilidad espacial puede ser de tipo agregada o distribuida. Los modelos agregados no tienen en cuenta adecuadamente la variabilidad espacial de las características hidrológicas, por ello, en los últimos años los desarrollos científicos han apuntado a la utilización de modelos hidrológicos distribuidos, ya que estos permiten representar de una manera más adecuada la variabilidad espacial de los procesos físicos involucrados en las crecidas, como lo son la precipitación y la generación de escorrentía superficial principalmente y a niveles de detalle de cuenca o de ladera. Es muy importante entonces, que la determinación de la escorrentía directa se haga de la manera más confiable posible ya que será la información de entrada para los modelos hidráulicos, y por ende es fundamental en la estimación del impacto de las inundaciones. Es decir, la incertidumbre del impacto de inundaciones puede ser alta si no se utilizan las herramientas adecuadas en la metodología de estimación de las variables involucradas en su estimación.

CASO DE ESTUDIO

La cuenca “Rambla del Poyo” conocida también como barranco de Chiva o barranco de Torrent está localizada en la provincia de Valencia, perteneciente a la región mediterránea de España, con unas características climáticas bastante específicas. El clima es de tipo subtropical (semiárido), las

temperaturas son suaves y constantes, la amplitud térmica es reducida, es un poco más lluvioso y más cálido a lo común en este tipo de clima, hay heladas de manera casual. En esta región concurren diversos factores que le imprimen una particularidad climática, su ubicación geográfica, la orientación del relieve, la fachada este de la costa y la presencia del mar mediterráneo, son elementos diferenciadores.

La cuenca se encuentra entre las cuencas de los principales ríos de la región, el Turia y el Júcar. El régimen de flujo es típicamente efímero, pero con riadas bastante frecuentes con caudales pico del orden de los 500 m³/s, debido principalmente a los fenómenos torrenciales extremos a que esta expuesta.

A efectos del análisis hidrológico se ha definido la zona de estudio entre las coordenadas UTM Norte 4357000 hasta 4382000 y UTM Este 682000 hasta 732000. Esta zona comprende, la rambla del Poyo y sus principales afluentes: los barrancos Horteta y Gallego con una superficie de 380 Km² y adicionalmente como sistema hidrológico independiente -pero con similares características que la Rambla del Poyo-, se tiene en cuenta el barranco del Pozalet que cuenta con una superficie de 33 Km². (Figura 1)

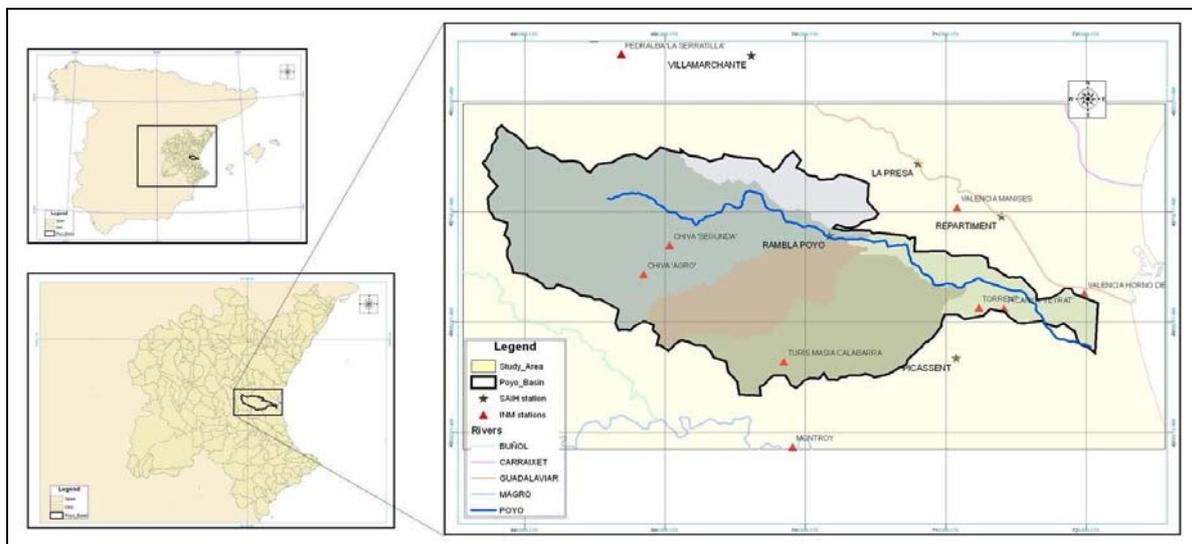


Figura 1.- Localización de la zona de estudio.

Respecto al régimen de lluvias de la cuenca, es bastante importante, la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones. Es característico el tiempo seco en verano e invierno y lluvias torrenciales en primavera y otoño. Durante el periodo de verano, el Mediterráneo alimenta las masas de aire con importantes cantidades de agua, que son descargadas violentamente en el periodo otoñal, con el fenómeno conocido como “Gota Fría”. Dentro de la cuenca hay ubicadas 5 estaciones de registro de lluvia a escala temporal diaria operadas por el Instituto Nacional de Meteorología de España y solo una estación de registro de lluvia y de caudal a escala cincominutal operadas por el Sistema de Alerta de Inundaciones en Tiempo Real de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Desafortunadamente, sólo tres eventos extremos de tormentas se han registrado en apenas 15 años de operación siendo pobre la descripción de la variabilidad espacial.

La vegetación típica es la compuesta por el llamado bosque mediterráneo compuesto por árboles perennifolios como la encina, el alcornoque y el pino y matorrales de arbustos y plantas aromáticas, como la coscoja, el lentisco, la jara, el romero y el tomillo. Durante el último siglo el uso y cobertura del suelo en la cuenca han cambiado apreciablemente. En la actualidad sólo la parte superior de la cuenca puede considerarse con una cobertura del suelo natural, la restante superficie

de la cuenca es una combinación de áreas urbanizadas y cultivos de regadío (principalmente naranjos).

METODOLOGÍA

La metodología de trabajo utiliza los últimos avances científicos y técnicos en el análisis hidrológico de cuencas naturales, enmarcándose en la utilización de diferentes enfoques multidisciplinarios, (meteorológicos, hidrológicos, hidráulicos, socio-económicos) necesarios para el análisis de inundaciones y la comparación de la aplicación de medidas de mitigación teniendo en cuenta los conceptos mencionados anteriormente, en el desarrollo del proyecto transnacional europeo de la "Eranet CRUE": Efficiency of non-structural flood mitigation measures: "room for the river" and "retaining water in the landscape". Se han definido dos fases dentro de la investigación relacionadas estrechamente, con aplicación directa en el caso de estudio y concatenadas en el tiempo por su prioridad de ejecución

La primera fase del trabajo desarrollado es la generación de escenarios hidrológicos futuros para evaluar la influencia en la peligrosidad del riesgo de inundaciones con respecto a la situación actual. Los efectos del cambio de cobertura natural del suelo en la generación de escorrentía son bastante significativos (Calder, 1993; Bronstert et al, 2002; Liu et al 2004), al igual que las medidas de mitigación que se adopten contra las inundaciones. Se han planteado cuatro escenarios de retención atendiendo a la realidad actual de la cuenca: i) cambio en el uso del suelo de cultivos de secano y monte de matorral a monte pinar, ii) construcción de un embalse en cercanías del núcleo urbano llamado Cheste iii) variante del anterior optimizándolo para caudales máximos entorno a los 100 años del periodo de retorno y iv) construcción de 184 pequeñas o medianas presas de retención en la cabecera de la cuenca con las mismas características de desagüe y volumen total a embalsar que el Embalse de Cheste.

En cuanto a las entradas del modelo, se ha considerado importante la variabilidad espacio-temporal de las tormentas extremas de tipo convectivo y la influencia del estado de humedad inicial de la cuenca en la producción de escorrentía. Para esto, se utilizaron por un lado, un conjunto de 100 de 217 tormentas sintéticas generadas con el modelo estocástico multidimensional RAINGEN-UPV (Salsón y García Bartual, 2003) debido a la poca información de eventos registrados así como la pobreza en su distribución espacial (solo una estación tiene información disponible a efectos del presente estudio) a través de la metodología propuesta en García B., R. y Salinas, J.L. (2007). Por otro lado, ya que no queda determinada la condición de humedad inicial en las tormentas sintéticas, se ha recurrido a una simulación continua a escala diaria, con información disponible sobre pluviometría y temperaturas de los últimos 52 años en 13 estaciones del Instituto Nacional de Meteorología de España más próximas a la cuenca y el caudal medio diario de la única estación de aforo ubicada en la cuenca proporcionada por el Sistema de Alerta de Inundaciones en Tiempo Real de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

La segunda fase del trabajo corresponde al análisis hidrológico de la cuenca como tal, con la utilización del modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual TETIS (Vélez, 2001). Se ha definido como escala de trabajo espacial, celdas de 100 de lado. A partir de la construcción de los diferentes mapas de parámetros de entrada para el modelo (modelo de elevación digital y sus derivados, cobertura del suelo, capacidad de almacenamiento hídrico de la capa superior del suelo, conductividad hidráulica saturada del suelo y del estrato rocoso) se ha calibrado el modelo mediante la aplicación de la metodología propuesta en Vélez, J.J. y Francés, F. (2004) y Francés, F. et al, (2007), para luego ser validado con los tres eventos extremos registrados en la misma estación de precipitación y aforos disponible.

Finalmente se ha realizado un análisis estadístico de los eventos simulados mediante metodología bivariada para introducir un análisis de frecuencia y la obtención de la probabilidad de ocurrencia de los caudales máximos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha generado como posible escenario de reforestación futuro el cambio de cobertura vegetal actual, pasando del 0.6% del total del área de la cuenca de monte pinar a un 55%, equivalente a un incremento de 11 mm del valor promedio areal del almacenamiento capilar la cuenca. El incremento equivalente en almacenamiento capilar promedio areal para el embalse de Cheste o los 184 microembalses es de 41 mm.

La simulación continua a escala temporal diaria para 50 años, demuestra que existe una independencia entre los eventos con caudales punta mayor a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ en el periodo otoñal (cuando se desarrollan las condiciones tormentas convectivas de mesoescala) y la condición de humedad inicial antecedente. Se han estimado dos condiciones de humedad representativas, una seca y una húmeda, con el 10% y el 70% del total de capacidad del almacenamiento hídrico del suelo, respectivamente.

Los principales procesos hidrológicos de la Rambla del Poyo han sido representados satisfactoriamente con el modelo hidrológico distribuido TETIS. Los resultados de calibración utilizando la metodología del SCE-UA (Francés et al, 2007) para el máximo evento histórico registrado en Octubre de 2000, proporcionan resultados aceptables con un índice de eficiencia de 0.82 y un error en balance de 0.2 % (Figura 2.). El modelo se ha validado para tres eventos registrados en la misma estación de precipitación y aforo. Los resultados de la validación temporal indican resultados aceptables (a pesar de la pobreza en los datos de registros) con valores de índice de eficiencia de 0.68, 0.44 y 0.58 para los eventos máximos históricos disponibles de 1988, 1989 y 1998, respectivamente.

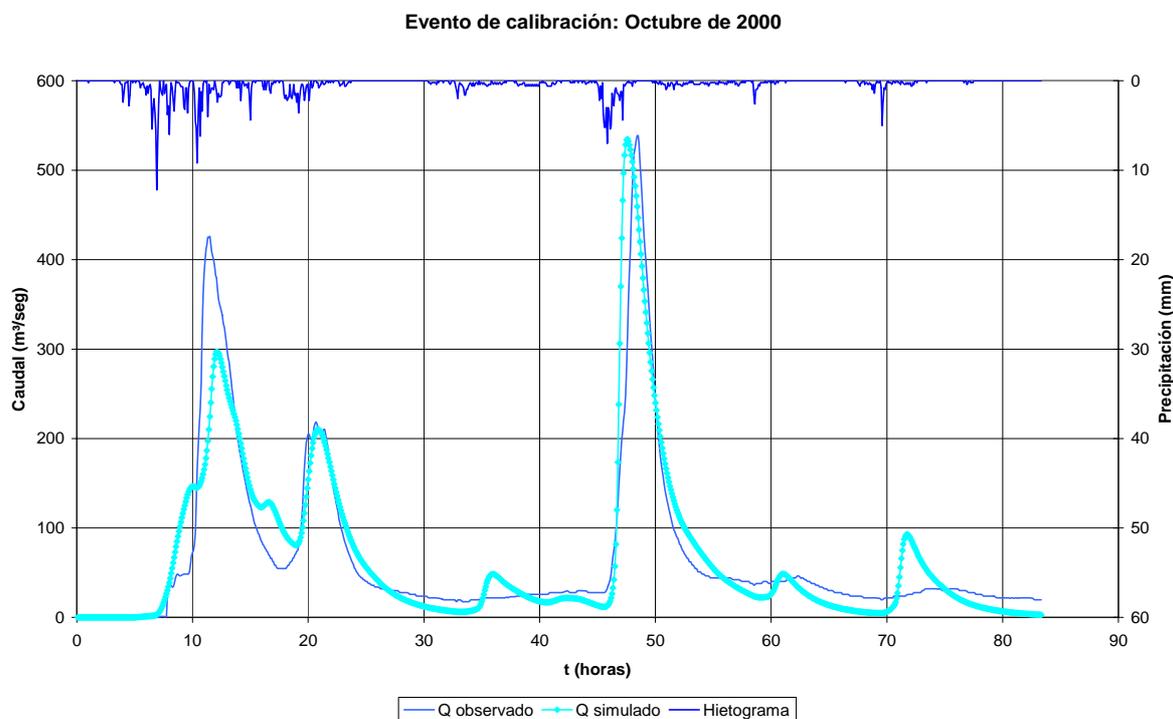


Figura 2.- Resultados de la calibración del modelo hidrológico

Se han simulado las tormentas sintéticas generadas con el modelo RAINGEN para los dos diferentes estados de humedad precedente, teniéndose un total de 200 simulaciones. La Figura 3. muestra el caudal máximo de descarga a la salida de la cuenca en función del periodo de retorno de la precipitación máxima areal en 24h. Se evidencia en la figura la influencia de la variabilidad espacio temporal de la precipitación y la condición de humedad inicial del suelo en la producción de escorrentía. En general los eventos en el periodo seco producen picos mas bajos que en el periodo húmedo. La diferencia espacial y temporal de cada tormenta se representa en la dispersión de los caudales máximos para eventos de similar magnitud en precipitación.

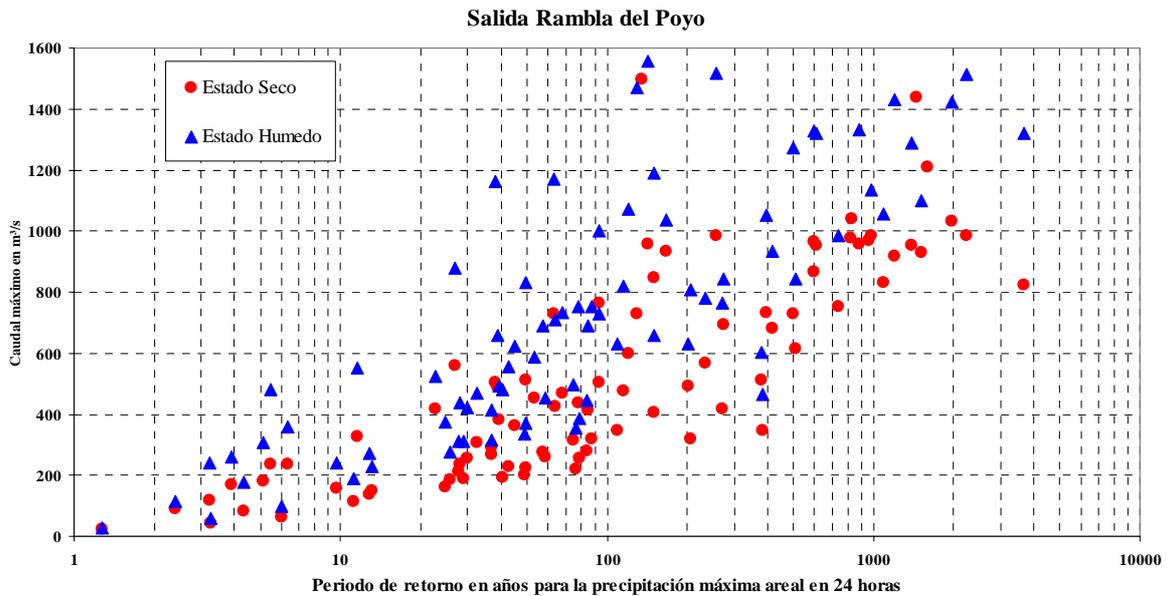


Figura 3.- Caudal máximo en función del periodo de retorno de la precipitación máxima areal en 24h.

A partir del análisis bivariado propuesto que asume la existencia de dos variables aleatorias correlacionadas: una asociada a la tormenta (la precipitación areal máxima de 24 horas, denominada R) y la otra correspondiente a la variable transformada de interés (caudal pico, denominada X), se ha determinado la función de distribución marginal de X, dado que se conoce una muestra de valores x condicionados a unas tormentas r no aleatorias de las que se conoce su distribución marginal. Se introducen adicionalmente, los dos estados de humedad inicial, obteniendo como resultado la función de distribución que se muestra en la Ecuación [1]:

$$F_X(a) \approx P[M = \text{seco}] \sum_{i=0}^{\infty} \frac{n_i(a)}{N_i} [F_{\text{seco}}(R_{i+1}) - F_{\text{seco}}(R_i)] + P[M = \text{humedo}] \sum_{j=0}^{\infty} \frac{n_j(a)}{N_j} [F_{\text{humedo}}(R_{j+1}) - F_{\text{humedo}}(R_j)] \quad [1]$$

A efectos de la zona de inundación, se ha encontrado que para caudales de magnitudes aproximadas de hasta 400 m³/s, la medida de mitigación más efectiva es el cambio de cobertura vegetal denominada reforestación. A partir de los 25 años de periodo de retorno aproximadamente, en general, los cuantiles de caudales para la medida de mitigación denominada embalse de Cheste son menores que las demás medidas de mitigación, siendo por tanto la más eficiente. (Figura 4).

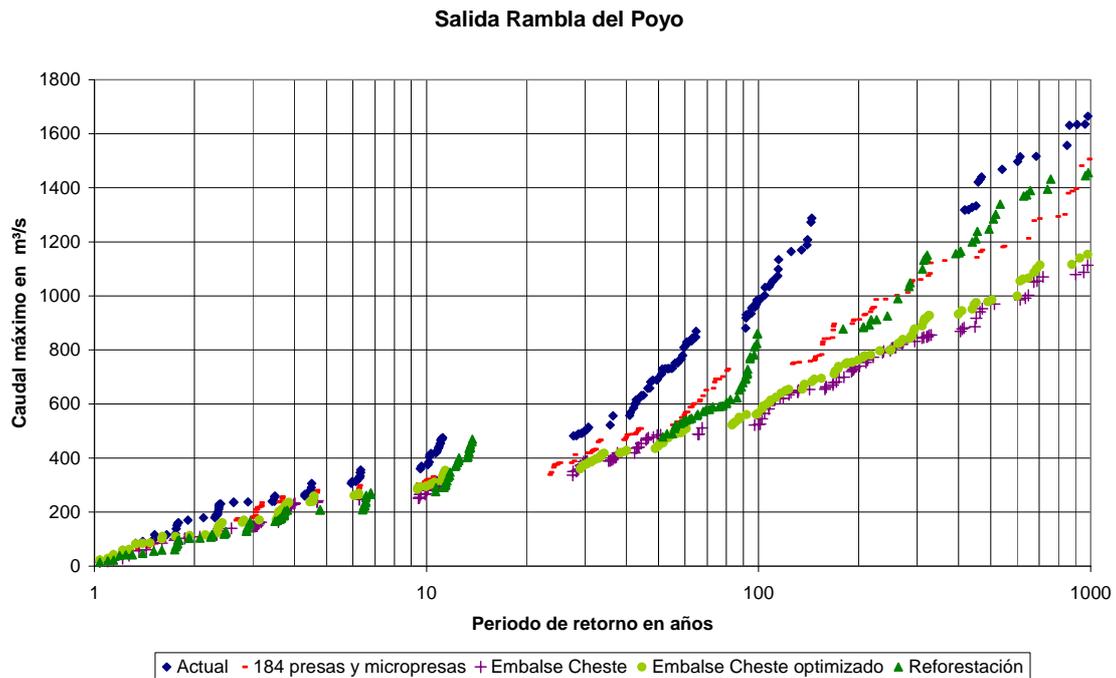


Figura 4.-Asignación de probabilidades (escenarios hidrológicos)

El promedio de porcentaje de reducción del caudal pico para las diferentes medidas de mitigación respecto al escenario actual (184 presas y micropresas, embalse Cheste, embalse Cheste optimizado y reforestación) en estado de humedad inicial seco son del orden del 8, 14, 20 y 38 % y para el estado de humedad inicial húmedo son del orden de 11, 20, 25 y 15 % respectivamente.

Los resultados indican que la eficiencia de cada medida de mitigación adoptada depende altamente de la relación entre el aumento en la capacidad de retención en el territorio y la magnitud de la inundación, y esta a su vez del estado de humedad del suelo al inicio del evento extremo. Una decisión sobre que medida acoger deberá ajustarse a un plan integral de gestión y manejo de inundaciones que involucre enfoques multicriterio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- García B., R. y Salinas J. L.** (2007). Synthetic rainstorms generation. *Valencia meeting. "Eranet CRUE": Efficiency of non-structural flood mitigation measures: "room for the river" and "retaining water in the landscape"*. <http://www.iiama.upv.es/roomfortheriver/home.html>
- Bronstert, A. Niehoff, D. and Bürger G.** (2002). Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrol. Process.* 16, 509–529.
- Calder, I.R.** (1993). Hydrologic effects of land-use change. In: *Maidment, D.R. (Ed.), Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, New York, p. 50 (Chapter 13).*
- Francés, F.** (1998). Using the TCEV distribution function with systematic and non-systematic data in a regional flood frequency analysis. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 12 (4), 267-283.
- Francés F, Vélez J.I. and Vélez J.J.** (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*: 332, 226– 240

Jarrett, R.D. and E.M. Tomlinson (2000). Regional interdisciplinary paleoflood approach to assess extreme flood potential. *Water Resources Research*, 10, 2957-2984

Liu Y.B. , De Smedt F. , Hoffmann L. and Pfister L. (2004) Assessing land use impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach.. *Environmental Modelling and Assessment* 9: 227–235.

Salsón, S. and García-Bartual (2003). A space-time rainfall generator for highly convective Mediterranean rainstorms. *Natural Hazards and Earth System Sciences - European Geosciences Union. Vol. 3: 103-114.*

Vélez, J. I. (2001). “Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas”. *Universidad Politécnica de Valencia, (DIHMA). Tesis Doctoral.*

Vélez, J.J. y Francés, F. (2004). La calibración automática en la modelación hidrológica distribuida de tipo conceptual. *Asamblea Hispano – Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Memorias. Figueira da Foz, Portugal.*