

MODIFICACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL DRENAJE URBANO Y RURAL DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO

Anido, Carlos (*)

*IMFIA, Facultad de Ingeniería, Udelar, Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo Uruguay.

Tel.: 598 24121533 - canido@fing.edu.uy

Resumen

El cambio climático ha generado aumentos de lluvia acumulada y eventos pluviométricos extremos mayores en Uruguay. El diseño de las dimensiones de las obras utilizadas para manejar los caudales de crecida en cuencas no aforadas, se basa en la estimación del caudal máximo en respuesta a una intensidad de lluvia para un tiempo de retorno para mostrar lo cual se pasa revista a la metodología empleada a fin de calcular los caudales máximos esperados, para señalar las relaciones entre esas intensidades crecientes influenciadas por el clima y las variables de diseño más importantes. La consecuencia de la vinculación es que las dimensiones de las obras actuales deben aumentar. Asimismo, se vuelven progresivamente ineficaces las obras anteriormente diseñadas basadas en el pasado. También quedarían subdimensionadas las realizaciones futuras si los métodos de evaluación empleados por los diseñadores usan estadísticas de eventos extremos que no estén actualizadas.

Introducción y Objetivos

El cambio climático, con sus aumentos de lluvia acumulada y eventos pluviométricos mas extremos con intensidad de lluvia mayor, tiene impactos sobre el diseño y dimensionado hidrológico-hidráulico de las redes de drenaje, desagües de aeropuertos, autopistas y zonas urbanas, canales, vertederos, aliviaderos, diques de tierra, presas, embalses y defensas contra inundaciones. Al proyectar una obra hidráulica y definir sus características funcionales, el diseñador formula previsiones sobre los valores que las variables consideradas podrán alcanzar en el futuro, especialmente los valores máximos y mínimos que podrán alcanzar en la vida útil del proyecto. Para esto precisa contar con la estadística de los extremos de intensidad de lluvia, lo que permitirá estimar para un tiempo de retorno y un riesgo de proyecto, con qué probabilidad de ocurrencia un sobrepasamiento de las dimensiones, debido al caudal hídrico producido por la cuenca aguas arriba, puede ser tolerada por los usuarios de una obra hidráulica para salvar los cursos de agua. Este artículo justifica, tras un análisis de la relación entre las variables y las intensidades de lluvia influenciadas por el cambio climático, tomando la experiencia y los trabajos realizados en el Instituto de Mecánica de los Fluidos, IMFIA, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica de Montevideo, Udelar, que se afirme que este cambio climático mencionado tiene efectos directos sobre la eficiencia de las obras ya realizadas y también sobre el funcionamiento de las obras futuras .

Métodos

Para establecer la relación del cambio climático con el diseño de obras de drenaje, *se pasa revista a las formas de establecer las dimensiones de obra, especialmente las que se emplean en Uruguay*. Las metodologías de diseño empleadas son el método racional y el propuesto por el antiguo Soil Conservation Service (SCS, actual National Resources Service, USA) para cuencas y tiempos de concentración pequeñas a medianas. *El primer valor decisivo en el proceso de determinación del caudal máximo, será entonces el tiempo de concentración del agua en la cuenca*, cuanto se necesita para recibir en la salida aportes de agua desde todos lados, incluidos los puntos más lejanos. El primero emplea la intensidad de lluvia para un tiempo de retorno dado que es igual al llamado tiempo de concentración de la cuenca. El segundo utiliza el concepto de tormenta de diseño, una tormenta ficticia estandarizada y estudiada para obtener un caudal máximo que ponga al diseñador de obras del lado de la seguridad cuando calcule, con una duración de algo menos que dos tiempos de concentración, junto con una metodología de cálculo del volumen total de caudal escurrido, basado en un modelo de infiltración del agua al terreno mientras está lloviendo, volumen que luego se supone un modo en que es escurrido en el tiempo gracias a otro modelo mas, el conocido como hidrograma unitario triangular. Al final superponiendo resultados para cada componente de la lluvia ficticia, se tiene un hidrograma de salida y un caudal máximo que es posteriormente usado en diseño de obras

Primero entonces se determina el tiempo de concentración de la cuenca hidrográfica para evaluar qué metodología emplear. Como una regla simplificada, si el tiempo de concentración resultante es menor a 20 minutos y el área de la cuenca es menor a 500 ha se recomienda aplicar el método racional. Para tiempos de concentración superiores a 20 minutos, se sugiere aplicar el método del SCS. Cuando el tiempo de concentración sea mayor a 20 minutos y el área de la cuenca de aporte sea menor a 400 has se deben verificar ambos métodos, y quedarse con el valor de caudal máximo más grande que resulte calculado, para estar del lado de la seguridad de la obra, dado que ambos consideran diferentes características del suelo para estimar la escorrentía. *Ambos métodos usan, para los cálculos, las intensidades de lluvia que*

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

salen de las curvas que relacionan las intensidades, las frecuencias y las duraciones conocidas como "curvas IDF".

Estas curvas tienen una vinculación positiva con el fenómeno del cambio climático, como surge de la forma de construirlas. Por esto describiremos lo más sucintamente posible cuestiones de la construcción y elaboración que hacen claras las relaciones entre variables y las intensidades que son las afectadas por la variación del clima.

Las curvas IDF se construyen como se describe en (Pizarro, 2003) y de ahí se ha tomado la descripción para identificar y señalar la relación entre variables y cambio climático. Se trabaja a partir de los datos tomados durante las tormentas por los pluviógrafos distribuidos sobre el territorio nacional. Al analizar las bandas de registro de los pluviógrafos, se seleccionan para cada año los valores extremos de precipitación para tiempos de 1, 2, 4, 6, 8, 12 y 24 horas, analizando las tormentas en un periodo de años escogido. Posteriormente, se dividieron por su duración D en horas, obteniéndose así las intensidades en mm/hr. Esto es un trabajo especialmente engorroso y que lleva tiempo, una de las principales dificultades para las administraciones deseosas de ahorrar inversión, pues hay que analizar una por una las cintas o los registros de los pluviógrafos, que en muchos casos todavía son mecánicos, lo que son cientos de cintas, para quedarse con uno o dos máximos por año y por duración. Una vez calculadas las intensidades máximas horarias de precipitación para cada estación y para cada año, se asigna a cada duración de lluvia seleccionada un periodo de retorno, para luego ajustar dichos valores a la Función de Distribución de Probabilidad de valor extremo conocida como la función de Gumbel o función de tipo I, también descrita en el artículo citado.

Una vez hecho el ajuste con la función de distribución de probabilidad de Gumbel, se procede a graficar la intensidad de precipitación y la duración, de modo de obtener los puntos de la curva asociada a un periodo de retorno por ejemplo de 5 años. Luego, se repitió la misma operación para todos los tiempos de retorno a considerar: T= 5, 10, 20, 30, 50,.....,100 años, y para cada una de las estaciones pluviográficas estudiadas que cubran el territorio nacional. Una vez obtenidas las curvas IDF para cada estación, se procede a analizar las variables involucradas y relacionarlas a las tres variables en una familia de curvas, de modo de representar la relación de la intensidad, duración y la frecuencia en forma gráfica y en forma analítica y todo esto está influenciado por el cambio climático:

$$I = \frac{kT^m}{D^n}$$

Donde k, m y n son constantes que se calculan mediante un análisis de regresión lineal múltiple, donde T es el periodo de retorno en años, D la duración en minutos u horas, e I la intensidad de precipitación en mm/hr. Para uso práctico se emplea una carta de izo líneas de intensidades de lluvia para 3 horas, 10 años de periodo de retorno y se dan nomogramas o funciones para hacer la corrección y pasar a otras duraciones y otros tiempos de retorno, incluyendo una corrección para cuando las áreas son grandes y crecientes del orden de 100 km² y más, donde las hipótesis de homogeneidad empiezan a fallar.

El tiempo de concentración en Uruguay se estima, al haber algo de pendiente media en el terreno que no es plano ni montañoso, con escurrimientos encauzados, con la fórmula llamada de Kirpich (IMFIA, 2002), para escurrimiento en cauce que tiene en cuenta la pendiente de los mismos, considerando la longitud del cauce principal

Este tiempo no está afectado por el cambio climático. Los datos de entrada son la longitud y las diferencia de cotas de altitud del cauce principal

Se calcula el tiempo de concentración aplicando la ecuación :

$$t_c = 0.019 L^{0.77} S^{-0.385}$$

donde:

t_c - tiempo de concentración (horas)

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

- L - longitud del cauce principal (km)
- ΔH - representa la diferencia de cotas de altitud del cauce principal (m)
- S - pendiente (%) = ΔH (m) / L (Km) / 10

En el caso de escurrimiento superficial no encauzado, que se puede dar en zonas urbanas y superficies pequeñas, antes de encauzarse, se usa otra propuesta del SCS, conocida como el método de velocidad, explicada en (IMFIA, 2002). Se calcula el tiempo de concentración para el flujo no concentrado aplicando la siguiente ecuación que considera pendiente, longitud y cobertura del suelo, para cada tramo de la línea de corriente entre 2 izo líneas topográficas:

$$t_c = \sum \left(\frac{L_i}{S_i} \right) \left(\frac{1}{k_i} \right)$$

donde:

- t_c - tiempo de concentración (horas)
- L_i - longitud del tramo i de la línea de corriente (km)
- k_i - coeficiente de cobertura del suelo para el tramo i.
- S_i - pendiente del tramo i (%) = $0.1 * \Delta H_i$ (m) / L_i (Km)

El valor de k surge de la tabla en Figura 15.2 de (SCS, 1985)

La determinación del caudal máximo esperable como respuesta hidrológica a una tormenta extrema usa distintos métodos según la superficie de la cuenca y el valor del tiempo de concentración, como ya se dijo; para tiempos pequeños, de minutos, se usa el llamado método racional como ya se dijo anteriormente. El método racional, empleado para pequeñas cuencas de menos de 1 km² para cuencas muy pequeñas de tipo urbano donde predomine el escurrimiento superficial se usan los datos de (Chow, 1994) usa la intensidad de lluvia esperada para un tiempo de retorno de la tormenta con la duración del tiempo de concentración de la lluvia en los cauces. Repetimos que es el tiempo en el que a la salida hay aportes desde toda la cuenca, incluyendo los puntos mas alejados de la salida.

Luego que se cuenta con el tiempo de concentración se procede a la estimación del caudal máximo esperable. Se calcula el caudal máximo, aplicando la ecuación :

$$Q_{max} = \frac{CA}{36}$$

donde:

- Q_{max} - caudal máximo (m³/s)
- C - coeficiente de escorrentía, depende de la cobertura y del tiempo de retorno
- i - intensidad uniforme en toda la cuenca para una duración igual al tiempo de concentración (mm/h)
- A - área de la cuenca (Ha)

El método racional está influenciado por el cambio climático por la intensidad usada, correspondiente al tiempo de concentración. Cuando las cuencas son grandes y el tiempo de concentración también, el método racional no sirve porque no se cumplen hipótesis de homogeneidad de la lluvia en el espacio y en el tiempo. Esto lleva a buscar otros métodos, que consideran sucesiones de periodos de tiempo donde las intensidades asociadas cumplan esos requerimientos de homogeneidad. El método empleado fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los EE.UU, SCS, para cuencas y tiempos mas grandes (SCS, 1985). Estima el volumen de escurrimiento y el hidrograma de crecidas para pequeñas cuencas no aforadas con escurrimiento concentrado en cauces.

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

El método calcula el volumen de escurrimiento de eventos extremos a partir de la conversión lluvia - escurrimiento de una precipitación *de una tormenta estandarizada compuesta de intensidades que van de un periodo a 24 periodos (que es influenciada por eso en esas intensidades tomadas de las IDF por el cambio climático)*, las características del suelo, cobertura de la cuenca y condiciones antecedentes de humedad. Además, propone la utilización de un hidrograma unitario triangular o adimensional para la estimación del caudal máximo y el hidrograma correspondiente al evento extremo, a partir de la precipitación efectiva.

A partir del valor del tiempo de concentración se obtiene el valor de la duración D, periodo empleado posteriormente en la metodología, aplicando la siguiente ecuación:

$D(\text{hs}) = tc/7$, donde: tc es el Tiempo de concentración (hs)

Resultados

Los métodos utilizados para estimar los caudales máximos para cuencas pequeñas y cuencas grandes no aforadas y con escurrimiento en cauce, *obtienen resultados que son afectados por el cambio climático, que modifica las intensidades esperadas asociadas a un tiempo de retorno*. Este diseño de las obras realizadas para manejar los caudales de crecida emplea la estimación del caudal pico de caudales en respuesta a las intensidades de lluvia, considerando una vida útil de obra y también tiempos de retorno de lluvias extremas. Con aquel se calculan dimensiones y diámetros del equipamiento para canalizar esos volúmenes sin comprometer el tránsito y el uso de la vialidad y otros equipamientos que salvan los cursos de agua. Para construir las curvas IDF se estudian las intensidades para distintas duraciones con eventos extremos anuales durante un período de años y se ajustan por una ley estadística como la de Gumbel para cada duración para cada estación pluviográfica. En el caso Uruguay fueron construidas por (Rodríguez Fontal, 1980) y desde entonces no hubo una actualización para el conjunto del territorio nacional.

Se ha comprobado por los registros meteorológicos oficiales que la cantidad de lluvia anual y la intensidad de lluvia han crecido en Uruguay en los últimos 30 años. La lluvia acumulada anual creció un 20% en la zona sur del Uruguay (IMFIA, 2011). Asimismo han habido en ese periodo de muchos años, eventos extremos de altas intensidades de lluvia y también eventos muy extremos y singulares como el temporal del 23 de agosto 2005 que azotó el sur del Uruguay y del Brasil, los que no están contabilizados en los estudios estadísticos que sirven de base al diseño anteriormente mencionado. Esto muestra que las estadísticas actualizadas mostrarán que los obras deberán ser más grandes pues los caudales esperados serán más grandes. Después de estos estudios hechos en 1980, sólo hubo una recomendación hecha a partir de la realización de proyectos de instalación y monitoreo de cuencas experimentales y escrita en las Directivas de diseño hidrológico -hidráulico de alcantarillas (IMFIA, 2002) y las Directivas de construcción de pequeñas represas hecho en 2003 por la Facultad de Ingeniería para el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Dirección de Vialidad y Dirección de Hidrografía, *sin que fuera obligatoria la modificación sugerida de tener en cuenta el aumento de las precipitaciones y de las intensidades, mediante la selección de intensidades obtenidas usando un periodo de retorno doble*. Este incremento del valor se recomendaba usar con el objetivo de proteger el diseño del aumento de caudales máximos en respuesta al aumento de las intensidades generado por el cambio climático en curso.

Dado que no hay información sobre cuanto se ha respetado esta recomendación surgida de un conocimiento experto, no sabemos cuantas obras siguieron la recomendación hecha al reconocer primariamente la variación climática dentro de la cual estamos, siendo que cuya aplicación aumentaba las dimensiones de la obra y además los costos económicos implícitamente. *Se puede sospechar que las consideraciones económicas han tendido, salvo necesidad o requerimientos específicos, a no seguir la directiva sugiriendo actuar de esa manera en muchos casos de obras hidráulicas a realizar*. Esto requeriría un estudio de evaluación específico de los proyectos pasados ocurridos en el periodo desde 1980, lo que esta afuera del alcance de este escrito.

Recientemente en 2011 se ha firmado un convenio entre la administración del estado y las secciones especializadas de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR para un estudio destinado a actualizar mediante la incorporación de las lluvias e intensidades extremas ocurridas en los últimos 30 años. Este no cubriría la actualización todo el territorio nacional, solo Montevideo y un par de ciudades del resto del país. Esto ha tenido fuerte impulso por parte de organismos internacionales dadores de préstamos para obras como el Banco Interamericano de Desarrollo, BID, que hacen seguimiento de las condiciones y las metodologías que se usan para diseñar y asegurar la vida útil de las obras hidráulicas emprendidas con sus préstamos, para asegurarse que funcionarán como estaba previsto en los proyectos originales. Se comprende que si se usa una estadística antigua, desactualizada, la obra realizada estaría subdimensionada y perdería eficacia, alcanzándose mas frecuentemente de lo deseado un sobrepasamiento de la capacidad. *La consecuencia de la subdimensión de las alcantarillas, al estar subestimado el pico de caudal, aun si hay un coeficiente de*

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

seguridad en los cálculos, es la ineficiencia progresiva del funcionamiento previsto, por el aumento en las intensidades asociadas a un período de retorno.

Conclusiones

Se puede entonces decir que el cambio climático hace progresivamente ineficaces las obras realizadas en el pasado, debido a las variables que emplean los métodos de diseño, que estuvieron alimentados con una estadística de eventos extremos pasada que se desactualiza progresivamente con la ocurrencia de eventos extremos nuevos que modifican las funciones de probabilidad, que no contenía la información del crecimiento de los eventos. *También sucede entonces que los métodos empleados, si siguen empleando la antigua información de las estadísticas de eventos extremos pasados, continúan subdimensionado las obras.* Esto sucede seguramente si no son puestas al día en los servicios de diseño hidráulico e hidrológico que se encargan de la ingeniería correspondiente. Esta puesta al día de la estadística surgida del estudio de tormentas, requiere considerar la lista de eventos extremos de intensidad de lluvia en función de la duración y el tiempo de retorno para todos los años transcurridos desde el último análisis, haciendo imprescindibles las inversiones necesarias por las administraciones centrales vinculadas al diseño de obras.

El cambio climático hace progresivamente insuficientes las obras calculadas y realizadas en el pasado y obliga ahora a realizar obras civiles de mayor dimensión para manejar el caudal máximo que aumenta en consecuencia con el crecimiento de los eventos.

Por esto las herramientas conceptuales de diseño deben estar actualizadas oficialmente. Para esto hay que tener por parte de las administraciones oficiales, las curvas IDF al día, de manera que la evaluación de caudales no sea menor de lo que requiere el comportamiento contemporáneo y para que en consecuencia no remanse en los caminos o en las bocas de tormenta. En el caso de Uruguay está planteado ahora hacerlo parcialmente, para una parte del territorio, esencialmente urbano. Cuando se disponga de la estadística actualizada, se podrá evaluar entonces el grado de ineficiencia en la capacidad esperada de drenaje que presentan las obras pasadas realizadas con datos antiguos o siguiendo recomendaciones basadas en conocimiento experto analizando con información sin actualización.

Referencias

Chow, V.T. Y Maidment, D. y Mays L., *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S. A., 1994.

IMFIA, (2002), *Directivas de Diseño Hidrológico -Hidráulico de Alcantarillas*, Facultad de Ingeniería UdelaR Montevideo, Uruguay

IMFIA, (2011), *Curso de Hidrología Avanzada I, Notas de Hidrología Superficial*, Facultad de Ingeniería UdelaR. Montevideo, Uruguay.

Rodríguez Fontal, Alberto. (1980) *Ecuaciones y ábacos para drenaje, desagüe de aeropuertos, autopistas y zonas urbanas, diques de tierra y defensa ante inundaciones* vol XIV, No. 2.30 abril 1980, Boletín de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo Uruguay

Pizarro, Roberto et al, *Construcción de Curvas IDF (Intensidad- Duración -Frecuencia) en Zonas semiáridas de Chile Central*. XII World Forestry Congress 2003, Quebec City, Canada.

Soil Conservation Service -SCS-, (1985) *National Engineering Handbook: Section 4, Hydrology*, (NEH-4), United States Department of Agriculture (USDA): USA