

PARA EL CONTROL DEL ESCURRIMIENTO PLUVIAL EN ZONA URBANA TROPICAL

Christophe BOUVIER, ORSTOM, Homero 1804, Col. Los Morales, 11510, México,
D.F.

RESUMEN: La aparición de nuevas formas de concentraciones urbanas, cuya población se caracteriza por una tasa de crecimiento demográfico rápido y recursos económicos muy reducidos, justifica la búsqueda de nuevas técnicas para el control del escurrimiento pluvial. Por lo que se refiere a las instalaciones, el autor de la presente propone una mayor utilización de las obras basadas en la retención del escurrimiento ; en el plano de los métodos de cálculo, se resumen las principales características de un modelo de escurrimiento elaborado para condiciones similares encontradas en Africa del Oeste.

INTRODUCCION:

Desde hace aproximadamente veinte años, ha aparecido en los países en vías de desarrollo (PVD) una nueva forma de concentraciones urbanas que se desarrollan rápidamente en la periferia de las ciudades "históricas". En México, los principales ejemplos son, en grados de desarrollo distinto, Nezahualcoyotl y Chalco, ambas situadas en la periferia de México. Las características de dichas aglomeraciones, ya sean físicas o demográficas, económicas o administrativas, no pueden compararse con las características más clásicas de las zonas urbanas de mayor antigüedad. En numerosos aspectos, y particularmente en lo que se refiere al control del escurrimiento pluvial, los métodos clásicos han dejado de ser efectivos y, por lo tanto, deben adaptarse a las nuevas formas de urbanización. Este artículo incluye, en particular, las perspectivas que se presentan en materia de concepto de obras, por una parte, y de desarrollo de modelos respecto al escurrimiento, por otra parte.

Las ideas y resultados que aparecen en este artículo proceden de un estudio de síntesis realizado sobre varias ciudades de Africa del Oeste: su adaptación al caso mexicano es actualmente objeto de un programa de estudio orientado hacia la aglomeración de Chalco.

1. CARACTERISTICAS DE LAS ZONAS URBANAS ESTUDIADAS.

Para empezar, mencionaremos, desde un punto de vista muy general, las principales características de las zonas urbanas de referencia.

En primer lugar, estas zonas se caracterizan, en el plano demográfico, por una tasa de crecimiento muy importante, superior a los 5% o más en la mayoría de los casos. Este aspecto implica la necesidad y urgencia de llevar a la práctica programas de ordenamiento particularmente flexibles y evolutivos que las técnicas y métodos disponibles no permiten a menudo.

En el plano económico, la urbanización que aparece en la periferia de las ciudades se caracteriza por la afluencia de poblaciones que proceden ya sea de zonas rurales y atraídas en este caso por la perspectiva de mejores condiciones de vida, o de zonas urbanas centrales y rechazadas, en este segundo caso, hacia la periferia por la falta de recursos. Las consecuencias de tales migraciones se traducen por un ingreso económico generalmente muy bajo de dichas poblaciones y la necesidad imperiosa de desarrollar esquemas de ordenamiento compatibles con los recursos económicos de las zonas estudiadas.

Y finalmente, en el plano físico, la ocupación del suelo es muy distinta de la que se observa en las partes centrales de las aglomeraciones. La diferencia principal reside en el hecho de que en la periferia de las ciudades existe una densidad muy diferente de las superficies impermeabilizadas, la cual induce unas modificaciones importantes en las características de los modelos matemáticos susceptibles de representar a los escurrimientos superficiales. También hay que tomar en cuenta otras modificaciones respecto a las condiciones de drenaje de las distintas viviendas.

En resumen, las condiciones específicas ligadas a la demografía, a la economía y a los modos de ocupación de los suelos de estas zonas urbanas nos conducen a pensar en otros métodos de ordenamiento, mismos que indicaremos en los siguientes párrafos.

2. EL CONCEPTO DE LAS OBRAS DE DRENAJE.

El concepto clásico de las obras de drenaje de las aguas pluviales estriba en la evacuación directa de los escurrimientos por medio de canales, colectores o conductos. Si bien es cierto que este tipo de obras ofrece numerosas ventajas, también presenta otros inconvenientes para las zonas urbanas periféricas que acabamos de describir:

1) El concepto de red no se adapta muy bien al crecimiento acelerado de la zona urbana: el desarrollo de dicha zona conduce rápidamente a la saturación de las obras primarias que concentran el conjunto de los escurrimientos, por lo que es necesario proceder a efectuar numerosas obras para aumentar las dimensiones de los colectores;

2) El diseño de los colectores debe tomar en cuenta las características de los aguaceros tropicales. Estas, al ser mucho más concentradas en el tiempo que en zonas templadas, hacen que se tengan que llevar a cabo obras de mayores dimensiones.;

3) El diseño importante de estas obras conlleva el riesgo de que estas se obstruyan progresivamente a raíz de la sedimentación causada por la fuerte densidad de las zonas aledañas no revestidas ; por lo que el funcionamiento correcto de tales obras requiere de la implementación de un servicio de mantenimiento eficaz.

Este conjunto de factores limitantes (grandes dimensiones, sustitución y mantenimiento de las obras) implica inversiones incompatibles con los recursos financieros disponibles en tales zonas. Sería interesante, en tales condiciones, someter a prueba las posibilidades ofertas para unas obras basadas, por el contrario, en la retención de los escurrimientos, sabiendo que la introducción de dichas obras permitiría:

1) Aumentar la duración de funcionamiento de la red por la colocación puntual de obras de retención, relativamente fáciles de instalar;

2) Reducir los volúmenes y los caudales de los escurrimientos por evacuar, y por lo tanto reducir las dimensiones de los colectores de la red;

3) Disminuir el riesgo de sedimentación al reducir las dimensiones de los colectores.

Por lo tanto, el hecho de añadir a la red clásica, unas instalaciones o aditamentos de retención del escurrimiento pluvial permitiría realizar sustanciales ahorros, aunque, para mayores beneficios aún, sería interesante que tales instalaciones pudieran ser costeadas por los mismos habitantes, ya sea individualmente o a través de asociaciones populares.

¿Cuales son las posibilidades existentes en materia de retención de escurrimiento? Son muy variadas y se basan en la construcción, o también en una combinación de ambas. Mencionaremos por ejemplo:

. La utilización de los techados para la retención;

. La construcción de pequeñas presas a la escala de la parcela de habitación o del barrio;

. El desarrollo de la vegetación para favorecer la infiltración,

. La utilización de materiales porosos o de adoquines para la construcción de vialidades;

. La adición de depósitos de retención en distintos nudos de la red, etc....

Finalmente, cabe mencionar que con la adopción de tales instalaciones se pueden esperar ciertos beneficios en cuanto a la reutilización del agua superficial para fines domésticos y para el recarga de la capa de agua subterránea.

La búsqueda e innovación en materia de concepción de obras de drenaje constituye por lo tanto, en varios aspectos, una alternativa que no hay que desechar. Sin embargo, resulta tan importante como lo anterior el interesarse en los métodos de diseño de las obras, representadas por la creación de modelos matemáticos que describen desde un punto de vista cuantitativo los escurrimientos superficiales en medio urbano.

3. LOS MODELOS DE ESCURRIMIENTO DE LAS AGUAS PLUVIALES

3.1. Introducción.

Los modelos matemáticos de transformación de la lluvia en escurrimiento constituyen un medio para evaluar los escurrimientos esperados en un punto en el que se desea realizar una instalación y, por consiguiente, permiten calcular las dimensiones que deben tener las instalaciones. Sin embargo, en el estado de las investigaciones actuales, el principal defecto de los modelos es que sólo funcionan en una situación dada, sin garantía de extrapolación a una situación nueva y diferente.

Los modelos de escurrimiento tradicionalmente utilizados en medio urbano, derivados de la fórmula racional o más recientes, fueron creados en su mayoría para tipos de urbanización encontrados en los países industrializados. Si se les compara con las anteriores, las zonas urbanas periféricas que se encuentran actualmente en los PVD se distinguen por un modo de ocupación de los suelos que ocasiona que las superficies no revestidas proporcionen una contribución importante al escurrimiento, por lo que resulta que la identificación clásica del coeficiente de escurrimiento de la cuenca con su coeficiente de impermeabilización no sea

válida en el caso de las zonas urbanas periféricas. Las condiciones de drenaje también son diferentes debido a que, en la mayoría de los casos, la red de drenaje de las zonas periféricas es mucho menos desarrollada que la de las zonas centrales.

En vista de que los modelos clásicos se adaptan mal al caso de las zonas urbanas periféricas mencionadas en 1., se ha implantado un nuevo modelo, cuya principal originalidad consiste en utilizar mediciones experimentales de permeabilidad del suelo para la evaluación del coeficiente de escurrimiento de la cuenca.

3.2 Análisis del proceso de escurrimiento pluvial, en cuencas africanas.

3.2.1. Presentación de las cuencas estudiadas

Las cuencas están situadas en 4 ciudades africanas: Niamey (Niger), Ougadougou (Burkina-Faso), Lome (Togo) y Abidjan (Costa de Marfil). En la Tabla 1 se presentan las características más importantes de estas cuencas.

IMP es el porcentaje de impermeabilidad. PER (nu) es el porcentaje de suelos desnudos, PER(veg) es el porcentaje de superficie cubierta con vegetación, Pmax es la profundidad máxima de las precipitaciones observadas, Kr es el coeficiente de escurrimiento promedio para las 5 tormentas más fuertes, observadas, y P2 es la precipitación periódica de retorno durante 2 años.

Cuenca	Numero de aguaceros	Area ha	IMP %	PER(nu) %	PER(veg) %	Pendiente m/km	Pmax mm	Kr %	P ₂ mm
Niamey 1	19	72	27	73	0	8,0	54	30	60
Niamey 2	15	42	31	69	0	10,0	51	46	60
Niamey 3	14	73	21	79	0	6,5	41	26	60
Niamey 4	14	124	21	79	0	11,4	40	42	60
Ouaga 1	22	48	10	90	0	10,5	39	51	70
Ouaga 2	26	173	25	75	0	6,9	39	50	70
Lomé 1	31	80	23	77	0	11,0	78	49	86
Yop 1	65	184	27	25	48	14,0	80	27	88
Yop 5	61	175	38	36	26	11,0	85	76	88
Yop 6	26	22	56	38	6	10,0	47	80	88
Yop 7	26	1110	21	24	55	11,0	51	25	88

Tabla 1: Características de cuencas.

Se han recabado los datos sobre precipitación y escurrimiento para un lapso de 2 a 4 años. Sin embargo, debido a condiciones climatológicas específicas, se retuvieron sólo desde 20 a 60 aguaceros.

En la tabla.1, la comparación de Kr e IMP indica una contribución muy significativa al escurrimiento desde superficies permeables. Esta es la mayor diferencia con el proceso de escurrimiento urbano en los países industrializados.

3.2.2. Las mediciones del escurrimiento en lotes experimentales.

De acuerdo con los diferentes tipos de suelo encontrados en las cuencas estudiadas, estudiamos, en proceso del escurrimiento pluvial, pequeños lotes ($1m^2$) con empleo de un simulador de lluvia. Tres lluvias de 40 a 120 mm/h fueron simuladas por un lapso de 1 hora, cada 10 horas, para probar las condiciones secas y húmedas. Para cada prueba se anotaron las pérdidas de escurrimiento en relación al tiempo. Se pueden identificar tres periodos (Figura 1):

- un período de humectación sin escurrimiento R, con una duración t_i y que corresponde a las pérdidas iniciales P_i .

- un período de pérdidas que disminuyen en el tiempo.

- después de una duración de t_m (15 a 30 minutos bajo condiciones húmedas o secas), las pérdidas llegan a un valor constante F_n .

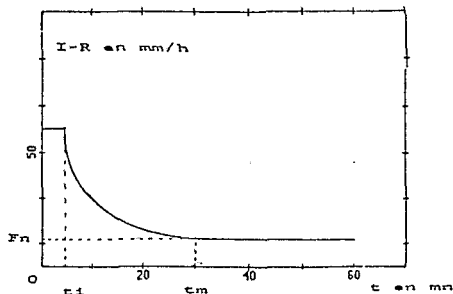


Figura 1:

Las pérdidas de drenaje en relación al tiempo.

Resulta que el proceso de escurrimiento es muy diferente según los tipos de suelo:

- sobre suelos cubiertos con vegetación (pasta o plantas tropicales), el escurrimiento es casi inexistente,

- en suelos desnudos, el escurrimiento es homogéneo para los 18 lotes estudiados en las cuencas. Además, no están relacionados los valores de F_n a la intensidad de precipitación. En la Tabla 2 se presentan los valores medios de los parámetros de proceso de escurrimiento pluvial.

Suelo desnudo seco Suelo humecto desnudo							
Ciudad	Numero de lotes	P _i mm	t _m mn	F _n mm/h	P _i mm	t _m mn	F _n mm/h
Niamey	5	4,3	30	6	1,7	15	4
Ouaga	6	3,5	30	5	1,3	13	1
Yopougon	4	2,1	15	3	1,2	13	2
Lomé	3	4,7	35	13	0,7	20	11

Tabla 2: valores medios de los parámetros de procesos de escurrimiento en lotes experimentales.

3.3 Resumen del modelo

El proceso de las pérdidas de precipitación pluvial considera que:

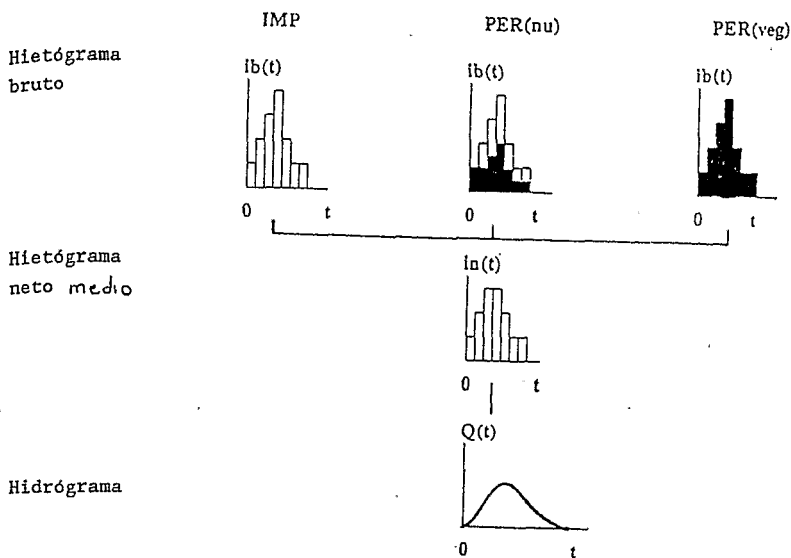
- a) No hay pérdidas sobre superficies impermeables, IMP,
- b) No hay escurrimiento sobre superficies cubiertas con vegetación, PEI (veg),
- c) Las pérdidas para suelos desnudos, PER(nu) son gobernadas por dos parámetros. STO es la pérdida inicial o de humectación; STO tiene un valor constante para cada evento. COEF es un coeficiente de escurrimiento constante que se utilizará cuando quedan cumplidas o completadas las pérdidas iniciales.

Para cada aguacero y cada uno de los tres tipos de superficie, se calcula un hietógrama neto de la lluvia de acuerdo con el modelo de pérdida correspondiente. Un hietógrama de la precipitación neta, media, en (t) luego se construye para toda la cuenca de captación pesando los tres casos anteriores de acuerdo con el porcentaje de cada tipo de superficie (figura 2).

El hietógrama medio de la precipitación neta luego se cambia en un hidrógrama, usando un llamado modelo de "estanque lineal". El gasto de escurrimiento Q(t) a la salida de la cuenca es:

$$Q(t) = A \int_0^t \frac{1}{K} \cdot i_n(s) \cdot \exp(-(t-s)/K) \cdot ds \quad (1)$$

en la cual A es área de la cuenca y K es el "time-lag" del estanque lineal.



Perdidas del escurrimiento

Figura 2: Computación de los volúmenes y flujos de escurrimiento

El modelo tiene 3 parámetros, STO, COEF y K, que se analizarán aquí.

3.4 Análisis de parámetros de pérdida.

De acuerdo con el proceso de pérdida seleccionado para la precipitación pluvial, se pueden derivar los valores experimentales de STO y COEF a partir de las mediciones de escurrimiento en lotes experimentales (ver el inciso anterior 2.1), como se muestra en la Figura 3.

Se considera $COEF_{ex}$ como la proporción entre la atrase constante de las pérdidas F_n y una lluvia con intensidad de 30 mm/h, completa a 1. La Tabla 3 da los valores medios de STO_{ex} y $COEF_{ex}$ para las cuencas estudiadas.

Cuencas	STO _{ex} mm	COEF _{ex}
Niamey	8	0,77
Ouagadougou	5	0,87
Yopougon	7	0,90
Lomé	8	0,57

Tabla 3: valores experimentales de parámetros de pérdidas.

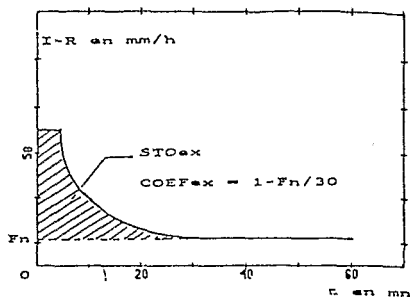


Figura 3: interpretación de STO y COEF.

Sin embargo, cuando se utilizan los valores en la Tabla 3, por lo general se sobrestiman los volúmenes del escurrimiento.

Puede obtenerse una simple relación a fin de lograr una estimación más precisa del volumen de escurrimiento (error menos de 25%, para 7 captaciones, sobre 11).

$$STO = 1.7 \cdot STO_{ex} \quad \text{y} \quad COEF = COEF_{ex} / 1.7 \quad (2)$$

3.5. Análisis de los gastos del escurrimiento.

Considerando los valores dados por las ecuaciones 2, para los parámetros STO y COEF, se calcularon los valores óptimos de los parámetros K, minimizando el error Qpc sobre los gastos máximos de los escurrimientos, de acuerdo con la ecuación:

$$EQ = \sum_i (|Q_{po_i} - Q_{pc_i}|) / Q_{po_i} \quad (3)$$

Para cada cuenca, da la tabla 4, valores óptimos para K y EQ. Generalmente, puede suponerse un nivel de precisión de 25%. Tampoco un cambio de -20 a +40% en los valores K, conduce a un cambio mayor de 25% en EQ.

Cuenca	N1	N2	N3	N4	O1	O2	L1	Y1	Y5	Y6	Y7
K (x5mn)	4,3	1,3	3,2	2,0	4,0	4,1	5,0	7,3	2,7	1,6	6,8
EQ (%)	19,8	17,3	19,9	24,3	30,7	18,3	21,4	26,1	31,1	20,6	21,1

Tabla 4: Valores óptimos de K, y errores correspondientes.

Puede relacionarse el valor óptimo de K, al área de la cuenca, A (ha), la pendiente media, P (m/m) y la proporción de impermeabilidad, IMP:

$$K = 0,45 \cdot A^{0,30} \cdot IMP^{-0,45} \cdot p^{-0,39} \quad (4)$$

3.6 Limitaciones del modelo.

Se establecieron las ecuaciones (2) y (4), para:

$$5 \text{ mm} < \text{STO}_{\text{ex}} < 8 \text{ mm} ; 0.57 < \text{COEF}_{\text{ex}} < 0.90 ; 8 \text{ m/km} < p < 15 \text{ m/km} \\ 0.1 < \text{IMP} < 0.55 ; 22 \text{ ha} < A < 1110 \text{ ha.}$$

No debe excederse el campo experimental, para fines de diseño. Además, puede decirse que este modelo funciona para cuencas sin significativas instalaciones o lugares de detención o infiltración.

Sin ninguna medición en los lotes experimentales, uno debe retener los valores defectuosos de 5 mm, para STO_{ex} y 0.87 para COEF_{ex} , que representan los valores medios que conseguimos a través las experiencias de campo.

4. CONCLUSIONES.

Tanto en el plano de las obras como en el de los métodos, la aparición y el desarrollo, en los PVD, de concentraciones urbanas caracterizadas por tasas importantes de crecimiento demográfico e ingresos económicos muy reducidos, implican la adopción de soluciones apropiadas que permitan remediar las carencias de las soluciones clásicas:

. en materia de obras, habrá que explotar con mayor intensidad las posibilidades de retención del escurrimiento pluvial;

en materia de desarrollo de modelos, ya se pueden aprovechar los resultados obtenidos en condiciones similares en Africa del Oeste, para representar los escurrimientos superficiales.

Sin embargo, en una perspectiva más general, es preciso enfocar otros objetivos como, por ejemplo:

. La creación de equipos multidisciplinarios y la experimentación de metodologías desarrolladas por estas últimas: de hecho, las múltiples implicaciones del agua en la ciudad hacen necesario tomar en cuenta no sólo la hidrología y la hidráulica superficiales, sino también la hidrogeología y más aún, las consecuencias del agua sobre la salud, la economía, la sociedad y la ecología del medio ambiente.

La creación de una herramienta de informática sintética capaz de tomar en cuenta los distintos aspectos físicos del agua y los diferentes modelos que los representan (aguas superficiales, subterráneas, puntos de vista cuantitativos y cualitativos); las aplicaciones de esta herramienta permitirán simular el funcionamiento de diferentes sistemas de instalación, comparar su desempeño respectivo y escoger la mejor solución.

Estos objetivos son los dos mayores del proyecto de estudios dedicado al Valle de Chalco y llevado a cabo por el ORSTOM y la UAM-X, con las que colaboran también, desde fechas recientes el Estado de México y la Comisión Nacional de Agua. Se estima que tales objetivos, descritos con mayor detalle en [2], se alcanzarán parcialmente de aquí a tres años.

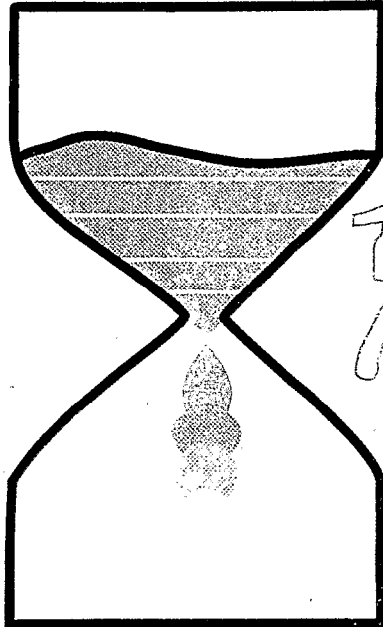
Bibliografía:

- [1] Bouvier C. (1989) Contribution à l'étude du ruissellement urbain en Afrique de l'Ouest. Application à la simulation de l'écoulement sur petits bassins urbains. Thèse de Doctorat, Université des Sciences, Montpellier, 313 p.
- [2] Bouvier C. (1990) Aspectos de la investigación para el manejo del recurso agua en el Valle de Chalco. Colloquio "El Agua" - CST - Estado de Mexico - Naucalpan, 14 y 15 de mayo de 1990
- [3] Desbordes M. (1987) Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain, Thèse de Doctorat d'Etat, Université des Sciences, Montpellier, 242 p.
- [4] Le Barbé L. (1982) Etude du ruissellement urbain à Ouagadougou, Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol.19, n°3, pp. 135-204
- [5] Lemoine L. et Michel C. (1972) Essai d'adaptation à l'Afrique Tropicale des méthodes classiques de calcul du débit des ouvrages d'assainissement urbain. CIEH, 35 p.
- [6] Sighomnou D. (1986) Assainissement pluvial en zone urbaine en Afrique Tropicale. Cas de Yopougon (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université des Sciences, Montpellier, 254 p.



11^o CONGRESO NACIONAL DE HIDRAULICA

Tomo I



*Agua
Prioridad
Nacional*

ASOCIACION
MEXICANA DE
HIDRAULICA, A.C.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 34.750 ex 1

Cote : B

M 23 OCT. 1991

Zacatecas, Zac. 2 al 5 de octubre de 1990

P52 ✓