

# MODELACION DE ESCURRIMIENTO EN CUENCA URBANA CON INTERACCION ENTRE SISTEMAS MAYOR Y MENOR

Gerardo Adrián Riccardi

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales-FCEIA- CIUNR-UNR,  
José Hernández 986, (2000) Rosario, Argentina. E\_mail: [riccardi@fceia.unr.edu.ar](mailto:riccardi@fceia.unr.edu.ar)

## RESUMEN

Se presenta la simulación hidrológica-hidráulica en una cuenca urbana de la ciudad de Rosario. El sistema menor de drenaje está constituido por conductos subterráneos, que resultan insuficientes para evacuar lluvias de recurrencias superiores a 1 año, por lo que habitualmente se produce interacción de flujo entre el sistema mayor y menor de drenaje. La modelación se realizó con un sistema estructurado en celdas describiendo el flujo a nivel de detalle de esquina con una precisión compatible con la información disponible. Fueron representadas diversas alternativas de flujo como almacenamiento en esquinas, remansos en cunetas, flujo a presión en conductos, e interacción entre sistemas mayor y menor. Se reprodujeron una serie de eventos históricos de los cuales se contó con registros de lluvia y caudal, cuantificándose posteriormente la inundación producida por una tormenta de proyecto de recurrencia  $R=2$  años. Asimismo, se estudió la capacidad del modelo para simulaciones con diferentes grados de detalle. El modelo estructurado en celdas logró reproducir la transformación lluvia-caudal con adecuada precisión, mostrándose robusto para la simulación integral de elementos considerablemente disímiles como porciones de calles y conductos. La simulación con una tormenta de diseño permitió generar una abundante información para el redimensionamiento del sistema menor.

## INTRODUCCION

Es habitual en cuencas urbanas ubicadas en sectores antiguos de grandes ciudades la presentación de inundaciones para lluvias de baja recurrencia si el crecimiento urbano no fue debidamente acompañado de una planificación del saneamiento pluvial. Estas inundaciones por lo general, son producidas por el subdimensionamiento de las antiguas redes de conductos. Si bien los conductos fueron inicialmente proyectados con adecuadas recurrencias de diseño, al producirse continuos procesos de impermeabilización que aumentan los caudales máximos y volúmenes de escurrimiento la red de drenaje se torna deficitaria. En estos escenarios hídricos se producen continuas interacciones entre el sistema mayor y menor de drenaje a través de sumideros, remansos sobre cunetas, almacenamiento temporarios en esquinas, flujo a presión en conductos y trasbases de cuenca por escurrimiento superficial.

Por otro lado, en lo concerniente a la modelación de los procesos involucrados en la transformación lluvia-caudal en ambientes rurales y urbanos el estado del conocimiento alcanzado a nivel mundial indica la existencia de un amplio y variado número de sistemas de modelación de calidad reconocida que permiten la representación de tales procesos, citando entre los más conocidos: SWMM; HEC-1; ILLUDAS; TR55; ARHYMO; MOUSE; OCINE2; etc. (Riccardi, 1999). Sin embargo, a pesar de la disponibilidad actual de información y herramientas existen limitaciones en el modelado. Algunas de las temáticas en las cuales se debe avanzar en el conocimiento están relacionadas con: desarrollo de modelos no sobrecomplicados, modelación con apropiados niveles de detalle, efectos de escala, modelado a pequeña escala, interacción de flujo entre sistemas mayor y menor. Comprendido

en las líneas citadas, el modelo CTSS8 (Riccardi, 1997, 1998, 1999) cuasibidimensional y multicapa, basado en esquemas de celdas (Cunge, 1975) ha demostrado ser una herramienta adecuada para la simulación hidrológica-hidráulica en ambientes rurales y urbanos. La estructura de modelación así planteada, ha resultado apta para la simulación con diferentes grados de detalle y en distintas escalas, desde simulación en pequeños conductos micro y macro cuencas urbanas y cuencas rurales. Permitiendo además en cada caso la desagregación máxima posible de los componentes físicos compatible con la información disponible (Riccardi, 1999)

## **OBJETIVOS**

La modelación tuvo por objeto representar mediante el sistema de modelación CTSS8 (Riccardi, 1999) el flujo a nivel de detalle de esquina con una precisión compatible con la información disponible simulando diversas alternativas particulares de flujo como almacenamiento en esquinas, remansos en cunetas, flujo a presión en conductos, e interacción entre sistemas mayor y menor. El grado de detalle empleado fue de 9.55 elementos/Ha.

Los trabajos comprendieron la reproducción de una serie de eventos ocurridos donde se registraron mediciones de lluvia-caudal y el posterior análisis del comportamiento hidráulico del sistema de drenaje con una lluvia de diseño de  $R=2$  años.

Simultáneamente a las simulaciones con alto grado de detalle se realizaron otros ensayos con menores grado de detalle, analizando la capacidad del modelo para representar la transformación lluvia-caudal con una serie de abstracciones del funcionamiento hidráulico del escurrimiento.

## **DESCRIPCION DEL AMBIENTE DE MODELACION, EL SISTEMA DE DRENAJE Y LA INFORMACIÓN DISPONIBLE**

La cuenca modelada está impermeabilizada en un 65% y su sistema de drenaje menor, constituido por una red de conductos subterráneos, resulta insuficiente para evacuar lluvias de recurrencias inferiores a 1 año. La extensión superficial de la cuenca es de 65 Ha, de las cuales 55 Ha drenan hacia el colector Lavallo de  $D=0.60$  m y el resto hacia otro conducto de  $D=0.40$  m. El colector Lavallo fue construido en los años 50, cuando el grado de impermeabilización de la zona era de aproximadamente un 20%; con el permanente aumento de la urbanización, y el consiguiente aumento de la superficie impermeable, la capacidad del conducto fue tornándose totalmente insuficiente para drenar lluvias de  $R < 1$  año. La simulación resultó de suma importancia puesto que se probó la capacidad del modelo CTSS8 en situaciones de flujo a presión donde se produce un permanente intercambio de flujo entre los sistemas menor y mayor de drenaje. En la Fig. 1 se presenta la planta de la cuenca.

El escurrimiento pluvial domiciliario de la cuenca drena en una proporción del 50% de los lotes hacia la calzada y el resto directamente hacia la red de conductos. El drenaje domiciliario se materializa mediante conductos de  $D=0.100$  m, con una pendiente longitudinal media de 1%. El escurrimiento por calles se colecta en sumideros de rejillas verticales y horizontales ubicados en su mayoría en puntos bajos de esquinas. La longitud total de sumideros es 180 m. La pendiente longitudinal media de las calles es de 1.8‰, y no se verifica una pendiente general predominante de la cuenca en ningún sentido. Las calles

tiene un ancho de 18 y 12 m con una zona pavimentada de 7 m de ancho. Los cordones cunetas tiene anchos variables entre 0.50 m y 0.60 m, con una pendiente transversal media del 10%. Las veredas son en su mayoría impermeables existiendo arbolado.

La cobertura superficial de la cuenca fue evaluada desde fotografía aéreas de la zona resultando un 35% de superficie permeable y 65% impermeable.

Los conductos subterráneos tienen diámetros variables desde 0.20 m hasta 0.60 m, con pendiente longitudinal media del 2.0‰. En la Fig. 2 se presenta la red de conductos subterráneos con  $D= 0.30$  m.

En el marco de una campaña de mediciones del conducto receptor del Lavalle (conducto Montevideo) se llevaron a cabo mediciones de alturas y velocidades en el conducto Lavalle durante varias tormentas por parte de la empresa Aguas Provinciales de Santa Fe. Adicionando a la información mencionada los registros pluviográficos llevados a cabo por el Departamento de Hidráulica (FCEIA, UNR) se logró establecer la relación lluvia-caudal en la cuenca para una serie de tormentas de bajas recurrencias ( $R < 1$  año) ocurridas en el año 1998 (Navarro, 1998). Las lluvias fueron inferiores a 15 mm. A través de los valores de velocidades y alturas aforados se estableció la relación altura-caudal en la sección de aforos, la misma se grafica en la Fig. 3.

## **IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE MODELACION**

La implementación del modelo CTSS8 se llevó a cabo con 625 celdas y 731 vinculaciones, 280 celdas correspondieron a porciones de manzanas, abarcando un área superficial de 43 Ha a un promedio de 1535.7 m<sup>2</sup>/celda; 226 celdas correspondieron a porciones de calles y bocacalles abarcando 22 Ha y 115 celdas representaron 5200 m de conductos subterráneos. Las condiciones de borde adoptadas fueron 2 relaciones H-Q en conductos y 2 en calles, utilizando 4 celdas ficticias. Considerando las celdas internas el grado de detalle de la modelación resultó 9.55 celdas/Ha (955 celdas/km<sup>2</sup>). Con el grado de detalle adoptado se lograron calcular alturas y caudales en cada una de los tramos de calles entre esquinas, en esquinas, y en tramos de conductos asociados. En la Fig. 4 se presenta la discretización espacial de la capa superficial.

En lo referente a vinculaciones, 280 correspondieron a uniones cinemáticas desde las porciones de manzana a las calles, 278 correspondieron a uniones río simple entre calles y 117 a uniones río simple entre conductos; las conexiones de los sumideros a los conductos se implementaron con 58 uniones tipo sumidero (una unión por esquina). Un mayor detalle del sistema de modelación puede encontrarse en Riccardi (1997y 1999) y Riccardi et al. (1998).

## **REPRODUCCION DE EVENTOS OBSERVADOS Y CALIBRACION DE PARAMETROS DE RESISTENCIA**

Se llevaron a cabo las simulaciones de las tormentas de las que se contaba información, calibrando durante las simulaciones los parámetros de resistencia de las diferentes modalidades de vinculaciones establecidas en la implementación del modelo. En el presente trabajo se exponen los resultados correspondientes a 3 tormentas, consideradas representativas del total

Las lluvias totales registradas fueron de 10 mm, 2.5 mm y 14.5 mm. Las lluvias netas se obtuvieron mediante la integración del hidrograma de salida, arrojando los siguientes valores:

*Tormenta 1:* Lluvia total: 10 mm Lluvia Neta: 2.59 mm  
*Tormenta 2:* Lluvia total: 2 mm Lluvia Neta: 0.45 mm  
*Tormenta 3:* Lluvia total: 14.5 mm Lluvia Neta: 3.50 mm

Considerando una pérdida inicial  $I_a = 1 \text{ mm}$  se calcularon los  $CN$  que ajustaron las lluvias netas observadas. Los valores calculados de  $CN$  resultaron entre 87 y 98. De acuerdo con la composición areal de la cuenca en lo concerniente a cobertura superficial y suponiendo que a la superficie totalmente impermeable se le asigna un  $CN = 98$  y a la permeable  $CN = 70$ , el  $CN$  ponderado arealmente resultó:  $CN = 0.35 \times 70 + 0.65 \times 98 = 88$ . La expresión de la pérdida inicial sugerida por el método del  $CN$   $I_a = 0.20 S$  arroja resultados totalmente inexactos.

Los valores calibrados de los parámetros de resistencia de las distintas vinculaciones resultaron los dados en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Parámetros de calibración**

Parámetro de resistencia	Valor
Coef. de Manning de escurrimiento desde manzanas	0.400
Coef. de Manning de escurrimiento por calles	0.027
Coef. de Manning de escurrimiento por conductos	0.020
Coef. de descarga de sumideros	0.700

En las Figs. 5 y 6 se presentan el hietograma con la deducción de las pérdidas y los hidrogramas observados y calculados para la Tormenta N° 1, las Figs. 7 y 8 corresponden a la Tormenta N° 3. En ambas tormentas se produce la entrada en carga de gran parte de los conductos subterráneos, alcanzando la línea piezométrica valores muy próximos al nivel de las calles. Este comportamiento es un claro indicador del infradimensionamiento del sistema de conductos, el cual con pequeñas láminas netas de escurrimiento comienza a trabajar a presión.

El modelo se comportó con robustez ante esta modalidad de flujo. Debe destacarse que al vincularse celdas con volúmenes tan disímiles como celdas de esquinas y conductos el intervalo de cálculo debió ser de modo tal de no permitir incrementos de volúmenes en cada paso de tiempo que puedan llenar o vaciar las celdas más pequeñas. El intervalo temporal utilizado fue de  $\Delta t = 1 \text{ s}$ . En la Fig. 9 se presentan perfiles de cotas máximas del conducto principal y del colector Cafferata para la Tormenta N° 3, donde claramente se observa el trabajo a presión de los conductos subterráneos.

Los hidrogramas calculados por el modelo CTSS8 se acercaron con una adecuada aproximación a los observados, tanto en el cuerpo general de las ondas de crecida y los tiempos característicos como en los valores máximos.

Puede afirmarse que el modelo representó con un tolerable nivel de precisión el escurrimiento en los eventos reales en los que se contrastaron resultados de simulación con valores observados.

## **IMPLEMENTACION DEL MODELO DISMINUYENDO EL GRADO DE DETALLE**

A los efectos de probar la respuesta del modelo ante una modelación con menor grado de detalle, se implementó el modelo con una cantidad de celdas considerablemente menor. Por simplicidad se representó el sector mayoritario de la cuenca que aporta al conducto Lavalle (55 Ha).

Para el escurrimiento superficial se consideraron 5 grandes celdas superficiales en las que se asumió que el flujo converge hacia el centro de gravedad de la figura geométrica y luego es captado por colectores que drenan hacia el conducto principal Pasco. En el caso de colmarse la capacidad hidráulica de los conductos el flujo se almacena superficialmente. En el conducto principal se consideraron 5 celdas y una última ficticia de borde donde se introdujo la relación H-Q. Como se mencionara para la vinculación entre las celdas superficiales y el conducto principal se emplearon 5 celdas tipo conducto. La implementación resultó en 16 celdas (15 internas) con un grado de detalle de 0.27 celdas/Ha. Este grado de detalle permitió la reproducción aproximada al fenómeno real de la variación de niveles y caudales en el conducto principal y toda la información hidráulica en la sección de control de la cuenca; nada se informa acerca del flujo en los tramos de calles y esquinas. Un esquema de la discretización espacial se presenta en la Fig. 10.

Durante la calibración de esta variante de discretización se estableció una resistencia equivalente en términos de coeficiente de Manning de  $\eta = 0.500$  para el escurrimiento superficial hasta la captación en conductos. La resistencia en conductos fue considerada con similares valores a los considerados en la simulación con 625 celdas.

Los hidrogramas calculados con este nuevo nivel de detalle y con los correspondientes a simulaciones con 625 celdas se contrastan en las Figs. 11 y 12. Como se infiere de la apreciación gráfica el grado de aproximación es completamente adecuado. Además de caudales fueron comparados los perfiles hidráulicos máximos en el conducto Pasco, donde mediante la implementación con 16 celdas puede ser estimado un perfil de cotas aproximado con 4 puntos. Los resultados se presentan en la Fig. 13. Se manifiesta una aproximación importante, teniendo en cuenta que cuando los conductos trabajan en carga, pequeñas variaciones de caudales pueden producir grandes variaciones de alturas piezométricas.

Se concluye que la implementación con 16 celdas es totalmente apta para la determinación del hidrograma saliente y para obtener con algún grado de aproximación el perfil hidráulico en el conducto principal.

## **SIMULACION DE TORMENTA DE RECURRENCIA $R=2$ AÑOS**

Para evaluar el hipotético impacto sobre la cuenca que produciría una lluvia de una recurrencia asociada a condiciones de diseño para sistemas menores de desagües pluviales, se simuló un evento de lluvia con  $R = 2$  años. Considerando las curvas Intensidad-Duración-Recurrencia de Rosario y una duración de 1 h, la tormenta de diseño resultó de 45 mm. La lluvia neta se estimó a partir de un  $CN=90$  y una pérdida inicial de 2.5 mm, lo que arrojó un valor de lluvia neta de 25.4 mm. El hietograma de diseño se estableció mediante la metodología del Servicio de Conservación de Suelos (Chow et al., 1987) que considera las intensidades máximas para duraciones menores a la duración de la lluvia. El bastón máximo

se ubicó en un tiempo aproximadamente igual al 40% de la duración de la lluvia. El hietograma resultante se grafica en la Fig. 14.

Como era de esperar, el escurrimiento resultante inundó las calles de la cuenca. Debido a la altimetría de las calles, existen esquinas en peores condiciones que otras, por lo que resultó de vital importancia este grado de detalle de la modelación para una adecuada evaluación de alturas de agua alcanzada y su duración temporal en cada esquina. En la Fig. 15 se presenta el hidrograma saliente constituido por los hidrogramas salientes por los 2 conductos subterráneos y por 2 esquinas donde se estimó un trasvasamiento de cuenca. La crecida prácticamente tiene una duración de 12 hs. Los perfiles hidráulicos máximos en el conducto Lavalle y varios colectores son representados en las Figs. 16 a 18. Estos perfiles indican claramente la operación en carga de los conductos y el nivel de agua en las calles sobre conductos.

En la Fig. 19 se grafica la variación temporal de la altura de agua sobre calle en dos esquinas sumamente comprometidas de la cuenca, Cochabamba y Lavalle y Pasco y Crespo. En ambos casos las alturas máximas superan los 0.50 m y en el mejor de los casos la permanencia de la crecida es de 8 hs. Por último, otra información extraíble de los resultados del modelo se presenta en la Fig. 20. Se trata de la presentación de las alturas máximas en esquinas (contadas a partir de fondo de cubeta de sumidero) en planta para todas las esquinas de la cuenca.

## **CONCLUSIONES**

El modelo ha logrado reproducir con elevada precisión una serie de eventos ocurridos donde fue posible registrar la información de lluvia y caudales salientes. El grado de detalle a nivel de tramo de calle y esquinas permite el desagregamiento del escurrimiento, alcanzando el escurrimiento simulado una alta concordancia con el registrado en el fenómeno real.

El sistema se mostró robusto para la simulación integral de elementos tan disímiles como porciones de calles y conductos. Fue posible modelar el escurrimiento en el sistema mayor y menor (con la variante en carga) como dos capas con dinámicas diferentes pero interconectadas por sumideros y cámaras.

El máximo intervalo de tiempo de cálculo está directamente relacionado con los volúmenes y con la tasa de intercambio de flujo en las celdas más pequeñas. En casos como esta prueba el  $\Delta t$  correspondió a 1 seg.

Para discretizaciones más gruesas, donde se plantean diversas abstracciones del funcionamiento hidráulico de la cuenca, el modelo resultó completamente apto para utilizarlo sin un alto grado de detalle.

La simulación para una tormenta de diseño de sistemas de colectores permite generar una abundante información para un minucioso redimensionamiento de la red de escurrimiento de la cuenca.

## LISTA DE SIMBOLOS

*D*: diámetro (m)  
*R*: Período medio de retorno o Recurrencia (años)  
*H*: altura del flujo (m)  
*Q*: caudal (m<sup>3</sup>/s)  
*Ia*: Pérdida inicial de escurrimiento (mm)  
*P*: Lluvia total  
*Pn*: Lluvia neta  
*S*: Máxima capacidad potencial de almacenamiento (mm)  
*CN*: Número adimensional de curva  
*η*: Coeficiente de resistencia de Manning  
*Δt*: Paso de tiempo de cálculo del sistema de modelación

## REFERENCIAS

**Cunge, J.**, (1975), Two Dimensional Modelling of Flood Plains Cap. 17 *Unsteady flow in open channels* (Ed. Mahmood K. and Yevjevich V.) Water Resources Publications, Fort Collins, pp. 705-762

**Chow, V.T., Maidment, D. y Mays, L.W.** (1987), *Applied Hydrology*, MacGraw-Hill, New York, USA (XIII+572) p.

**Navarro, R.**, (1998), *Informes Técnicos Convenio APSF-FCEIA*, Departamento de Hidráulica, FCEIA, UNR, Rosario.

**Riccardi, G.**, (1997) The mathematical modelling of flood propagation for the delimitation of inundation risk zones, en *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty* (ed. D. Rosberg et al.) IAHS Publication Nro 240, ISSN 0144-7815., Wallingford, pp. 55-64

**Riccardi, G.**, (1999), *Un Sistema de Modelación Hidrológica-Hidráulica cuasi-bidimensional multicapa para ambientes rurales y urbanos*, Informe de Tesis Doctoral, FCEfyN, UNC, (289)p

**Riccardi, G. A., Zimmermann, E. D. y Maurig, R.** (1998), Mathematical Modelling of flood propagation for the delimitation of rural, semiurbanized and urbanized zones with inundation risk, en *Runoff computations for water projects*, Edit. A.V. Rozhdestvensky, IHP-V Technical Documents in Hydrology N° 9, UNESCO, Paris, 127-138.

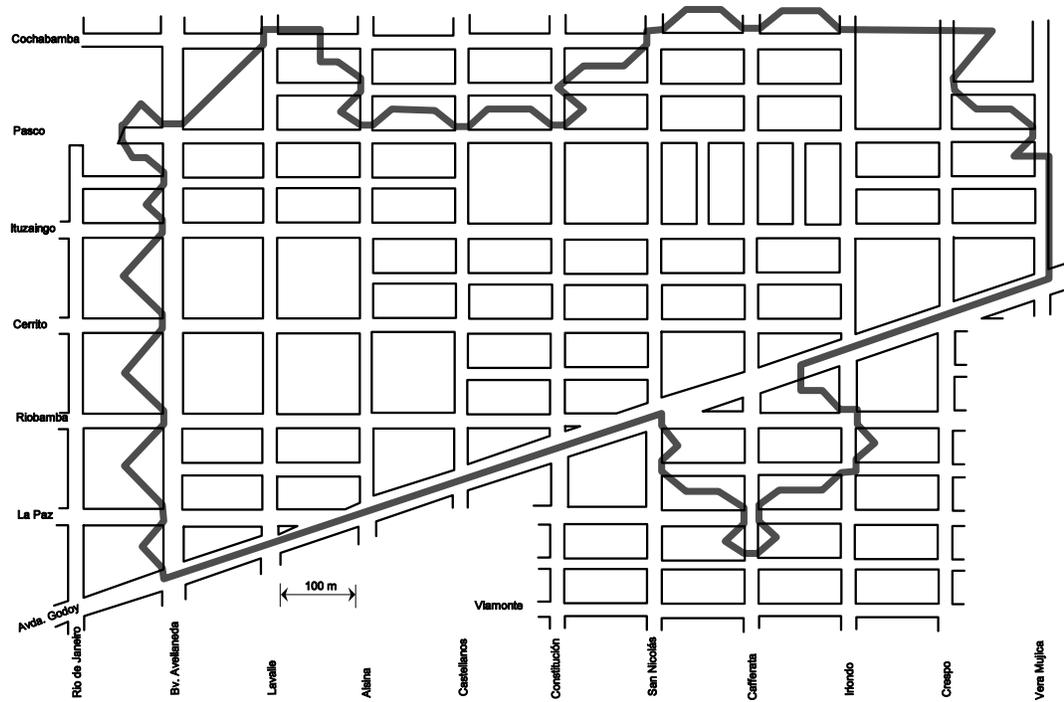


Figura 1. Planimetría de la cuenca

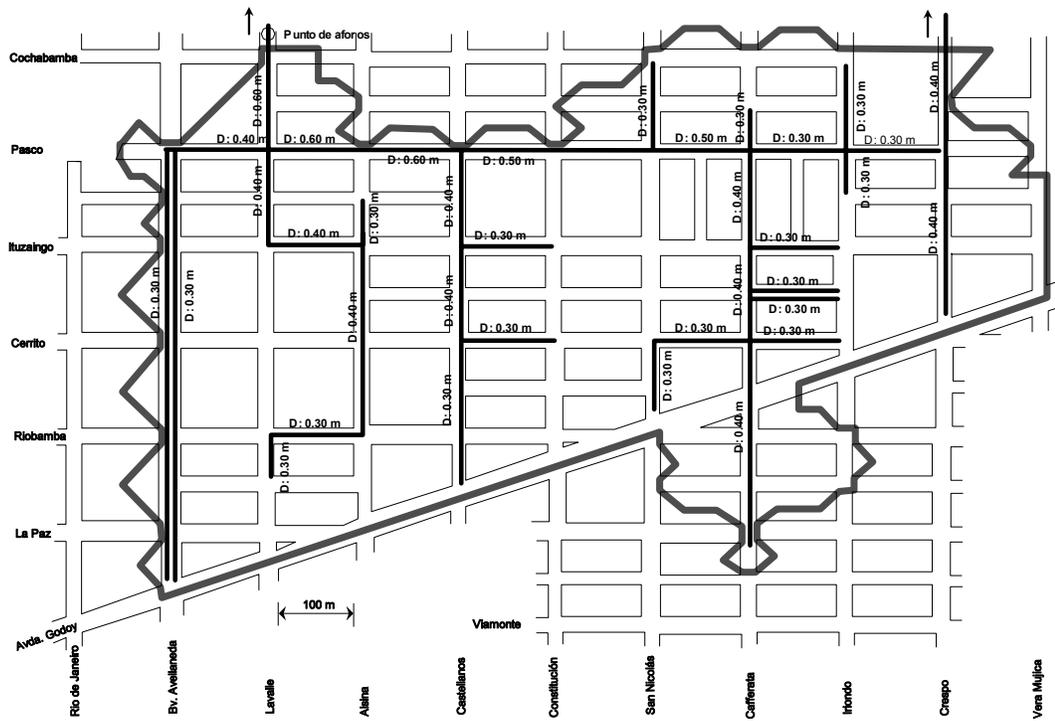


Figura 2. Red de conductos cerrados subterráneos

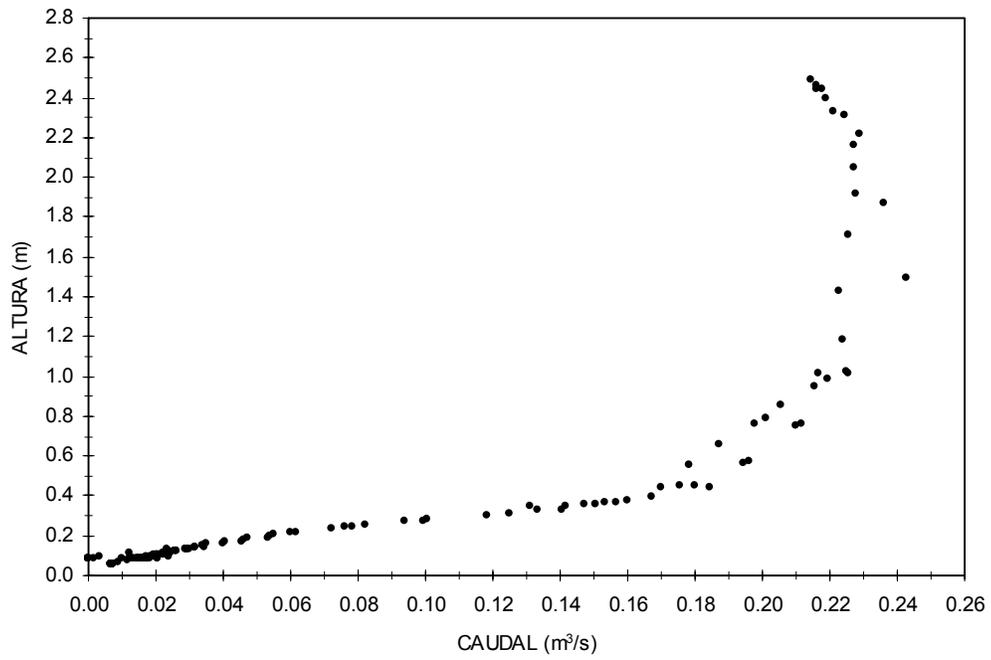


Figura 3. Relación altura-caudal observada de Conducto Lavelle esq. Cochabamba

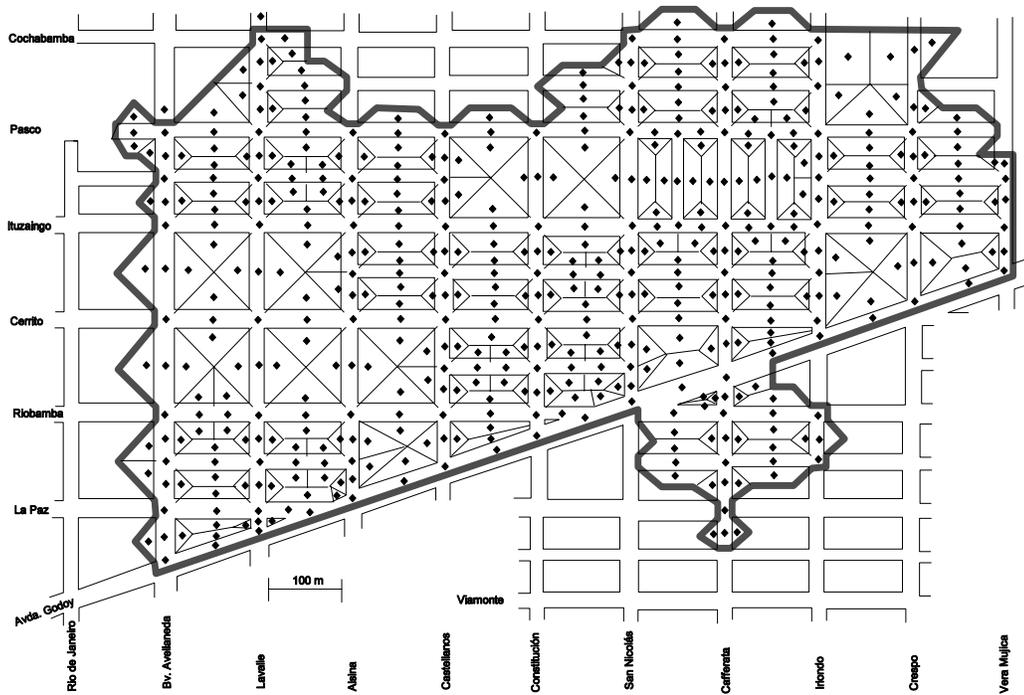


Figura 4. Discretización espacial de la capa superficial

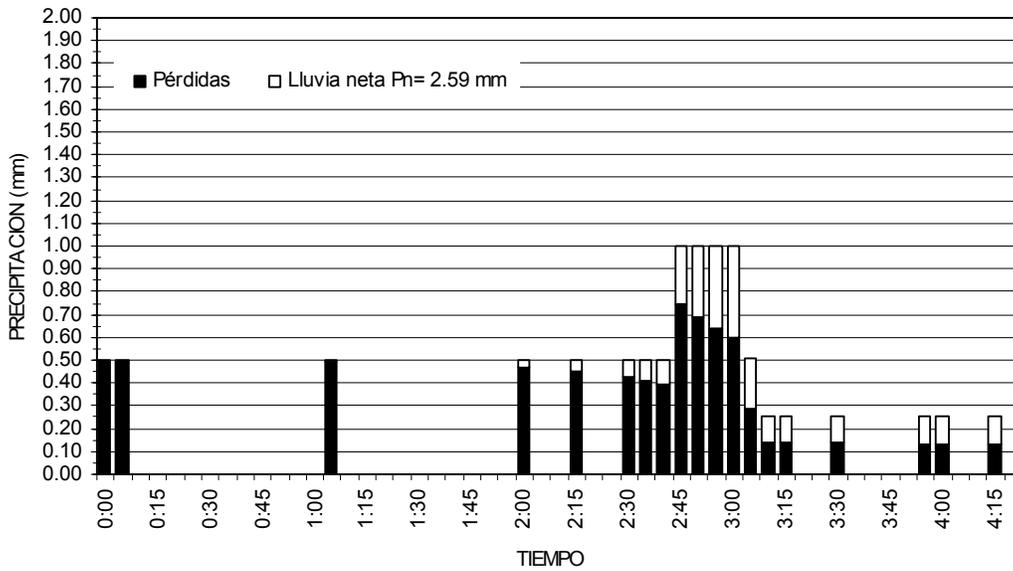


Figura 5. Tormenta N° 1. P: 10 mm. Hietograma neto y pérdidas

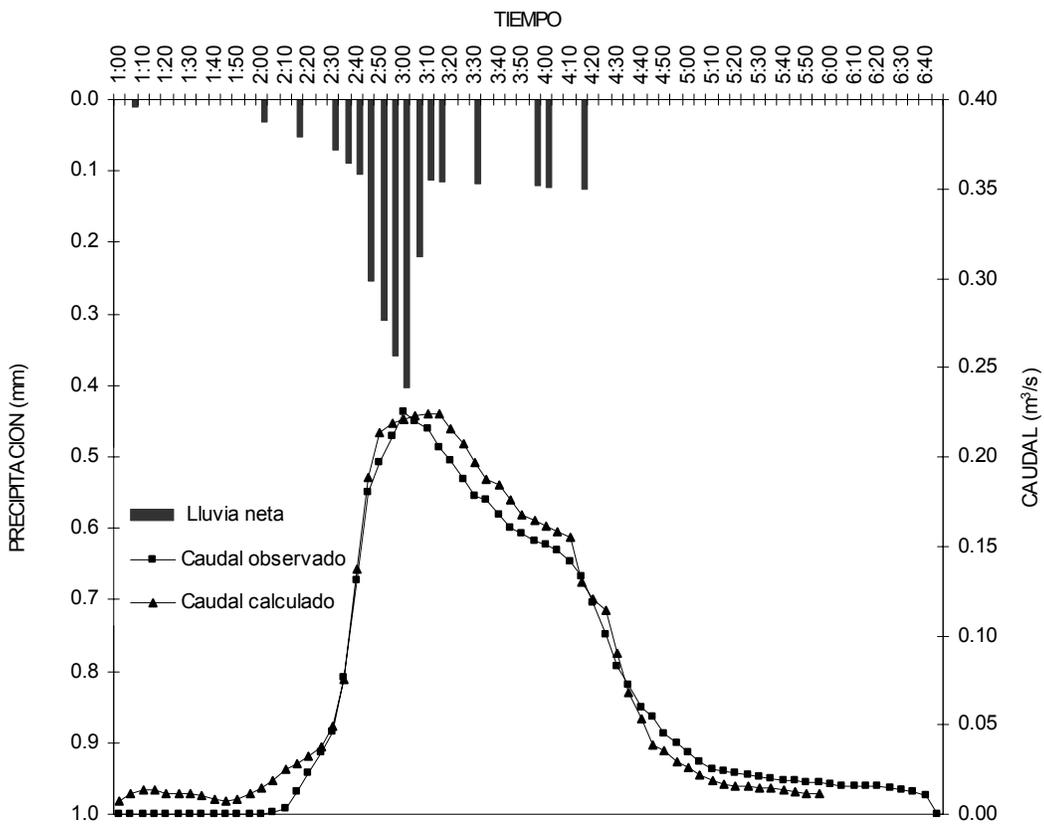


Figura 6. Tormenta N° 1. P: 10 mm. Lluvia neta y caudales observados y calculados

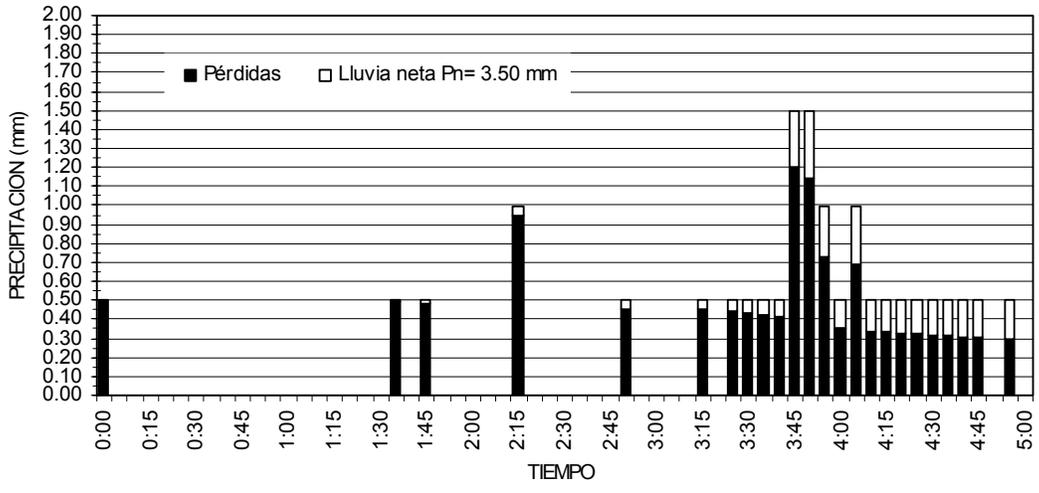


Figura 7. Tormenta N° 2. P: 14.5 mm. Hietograma neto y pérdidas

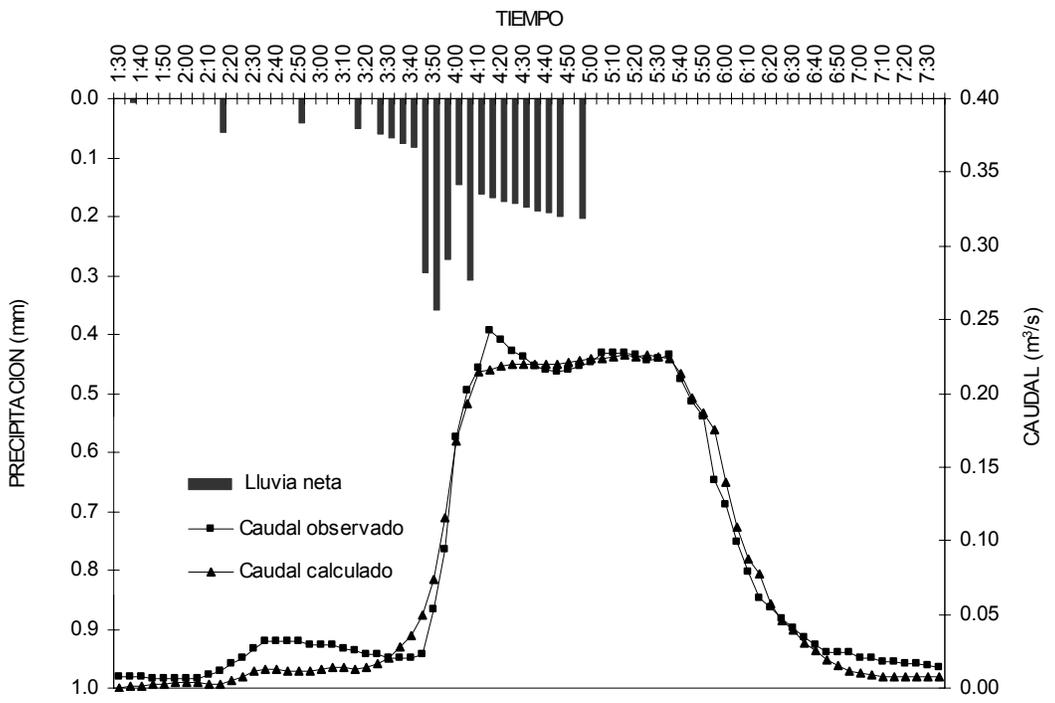
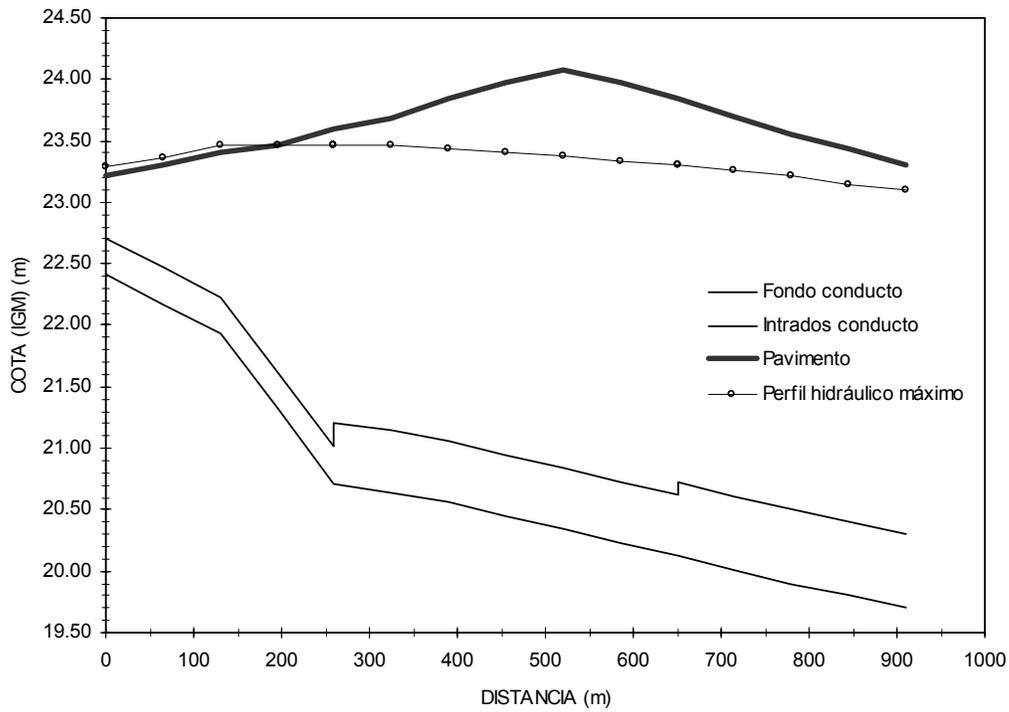
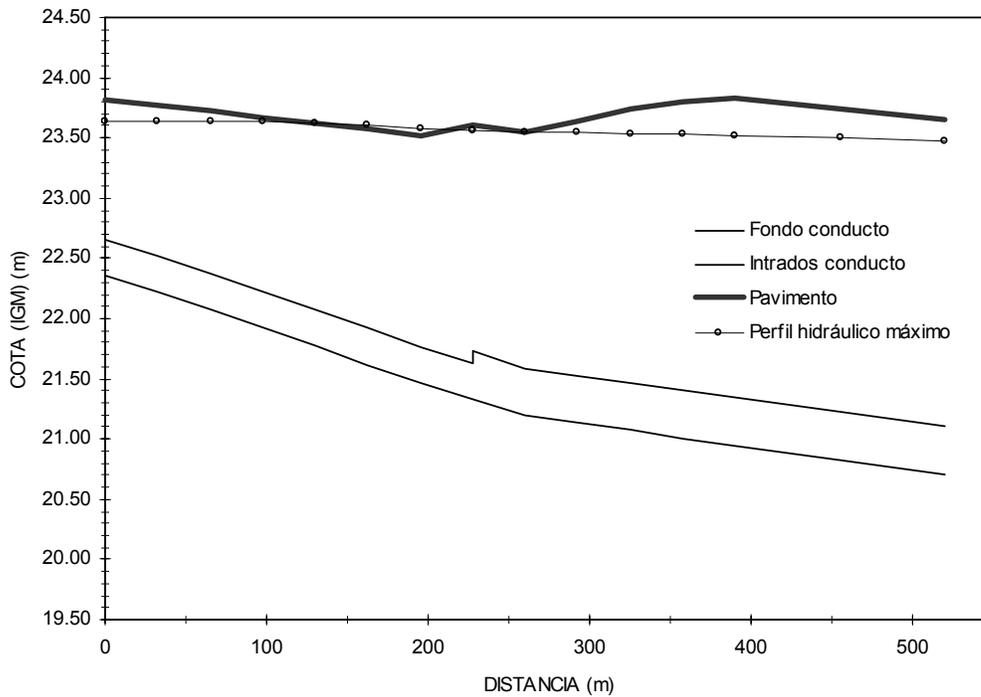


Figura 8. Tormenta N° 2. P: 14.5 mm. Lluvia neta y caudales observados y calculados



(a)



(b)

**Figura 9. Perfiles de cotas máximas. Tormenta N° 1. P: 14.5 mm**  
**(a) Conducto Principal Pasco; (b) Colector Cafferata**

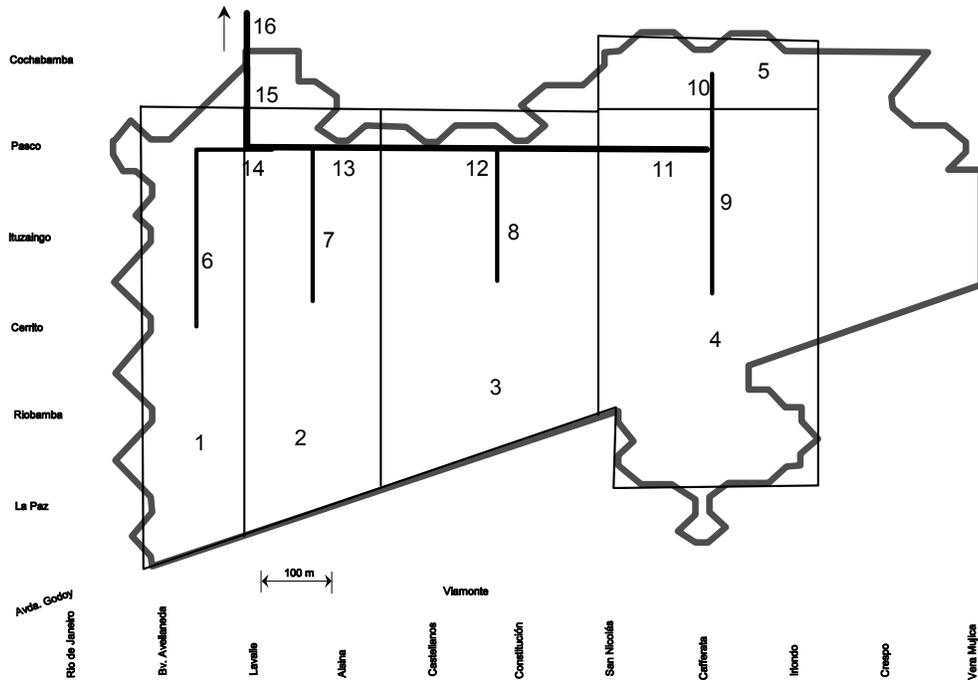


Figura 10. Cuenca de Colector Lavalle. Discretización con 16 celdas

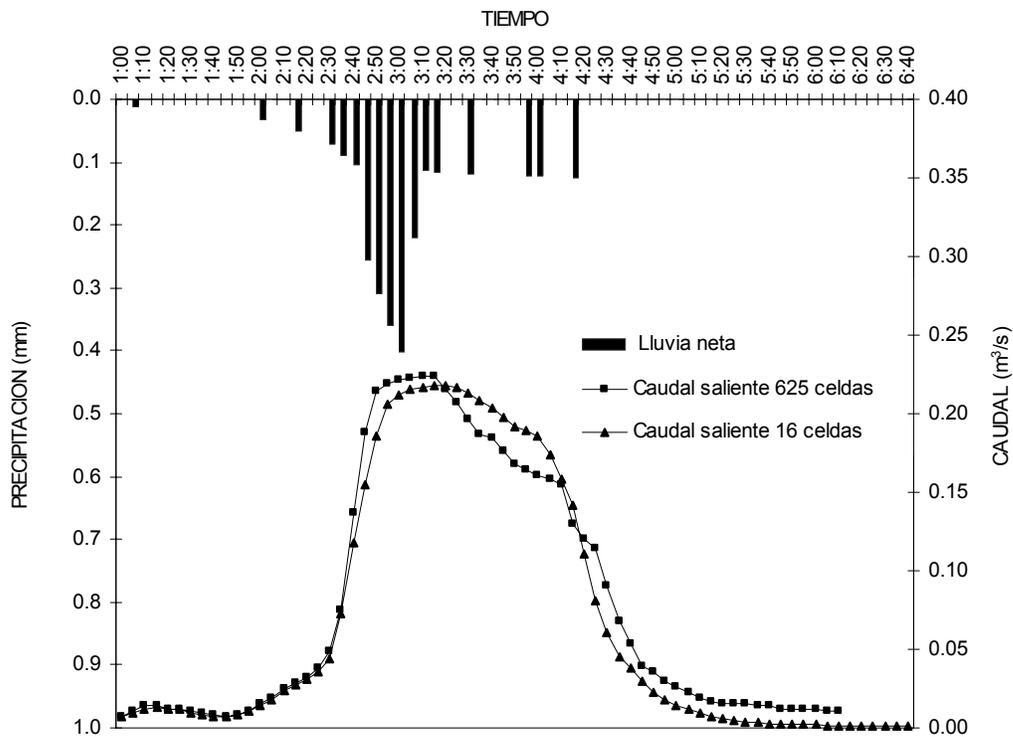
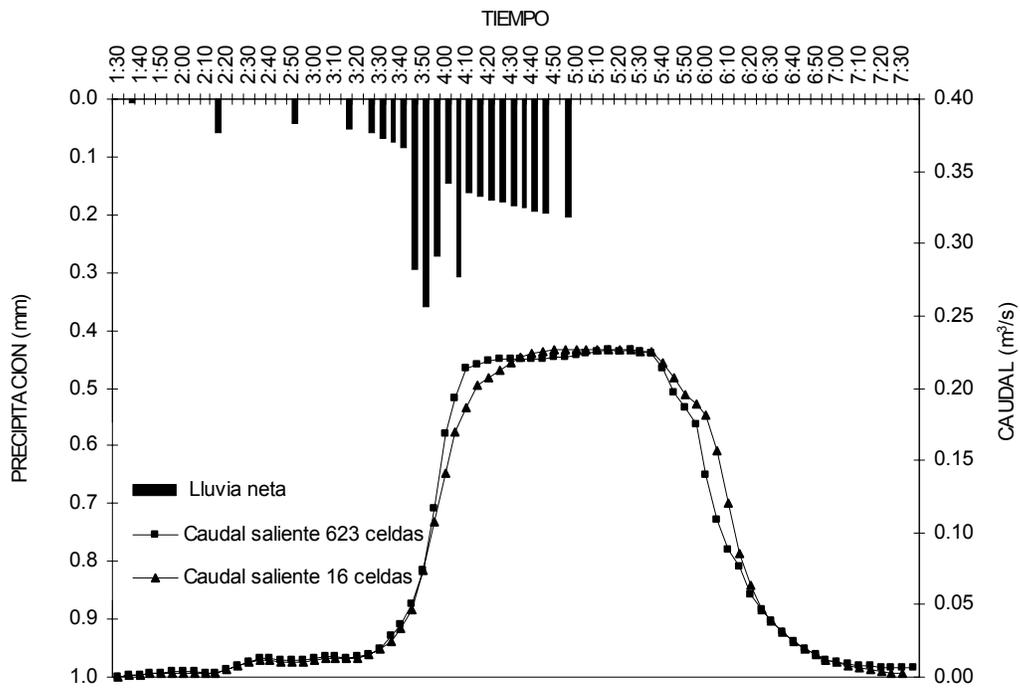
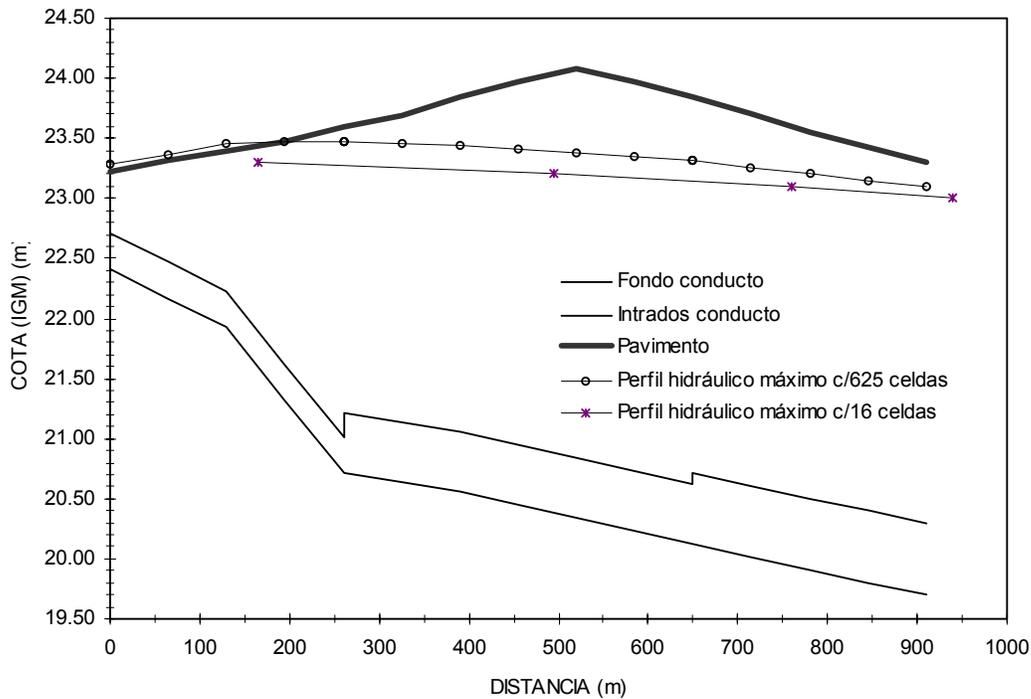


Figura 11. Tormenta N° 1. P: 10 mm. Variación de nivel de detalle  
Comparación de hidrogramas



**Figura 12. Tormenta N° 2. P: 14.5 mm. Variación de nivel de detalle  
Comparación de hidrogramas.**



**Figura 13. Variación de grado de detalle. Tormenta N° 2. P: 14.5 mm  
Perfiles hidráulicos máximos en Conducto Pasco**

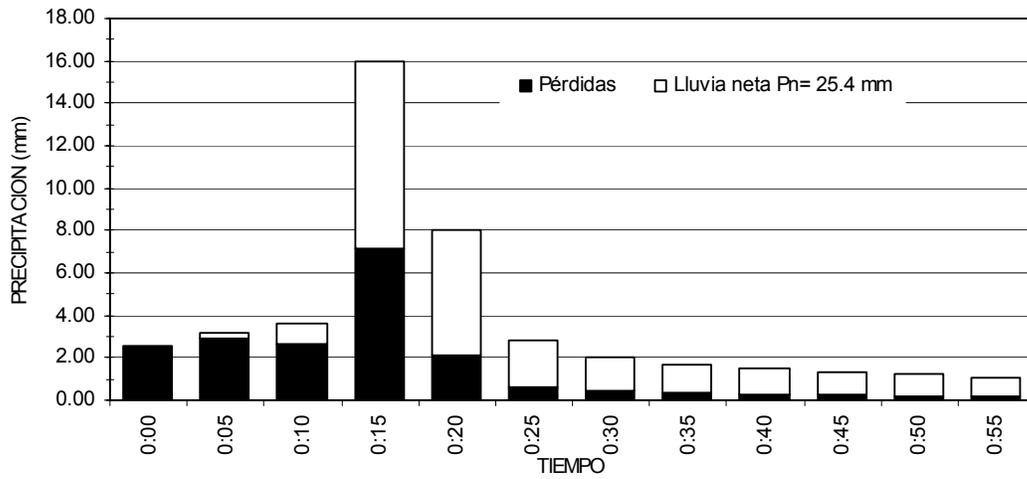


Figura 14. Tormenta de recurrencia R= 2 años. P: 45 mm. Hietograma neto y pérdidas

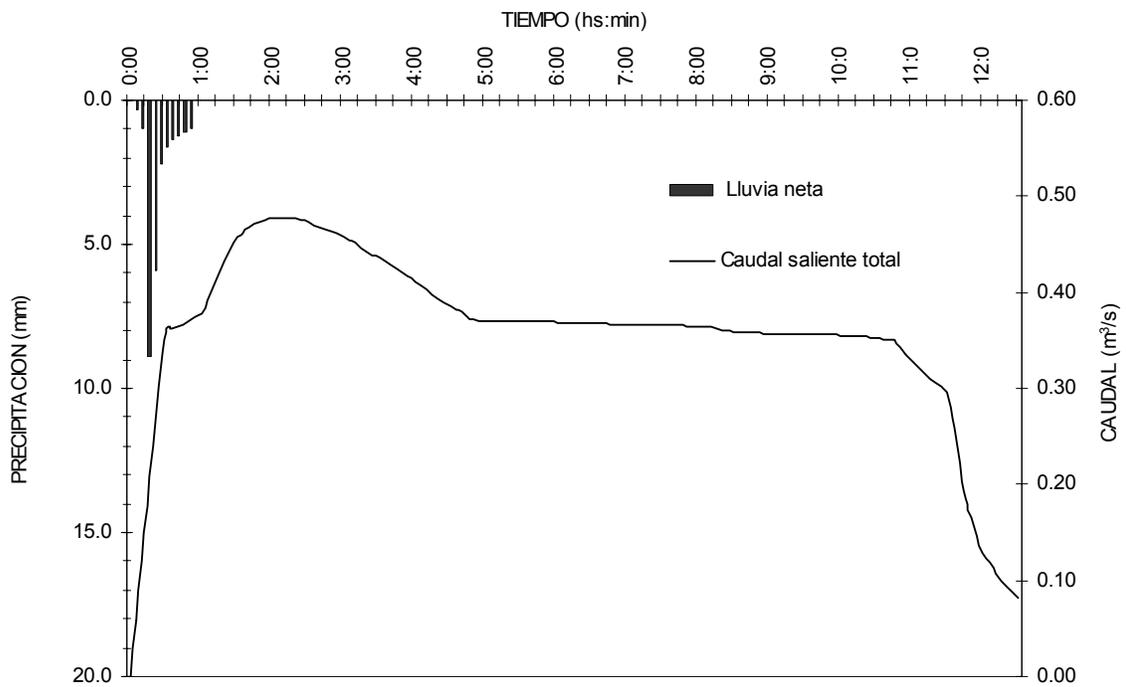
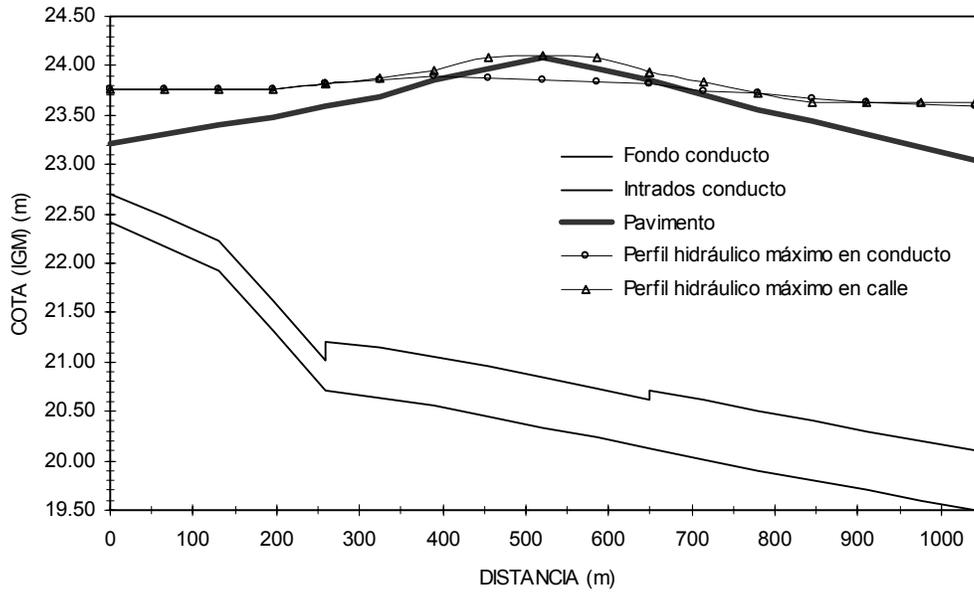
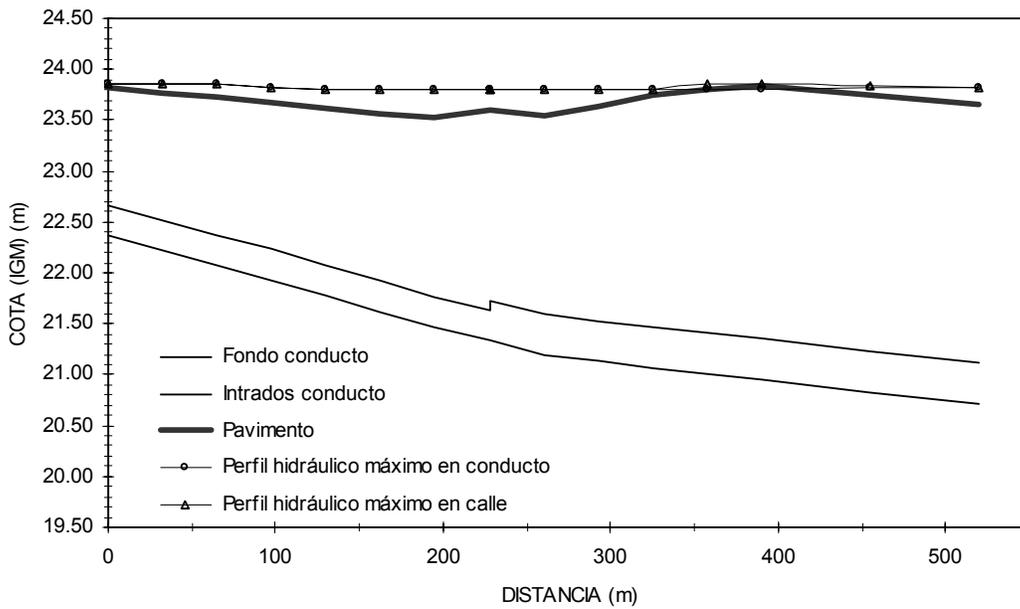


Figura 15. Tormenta de recurrencia R= 2 años. Lluvia neta e hidrogramas saliente y calculado

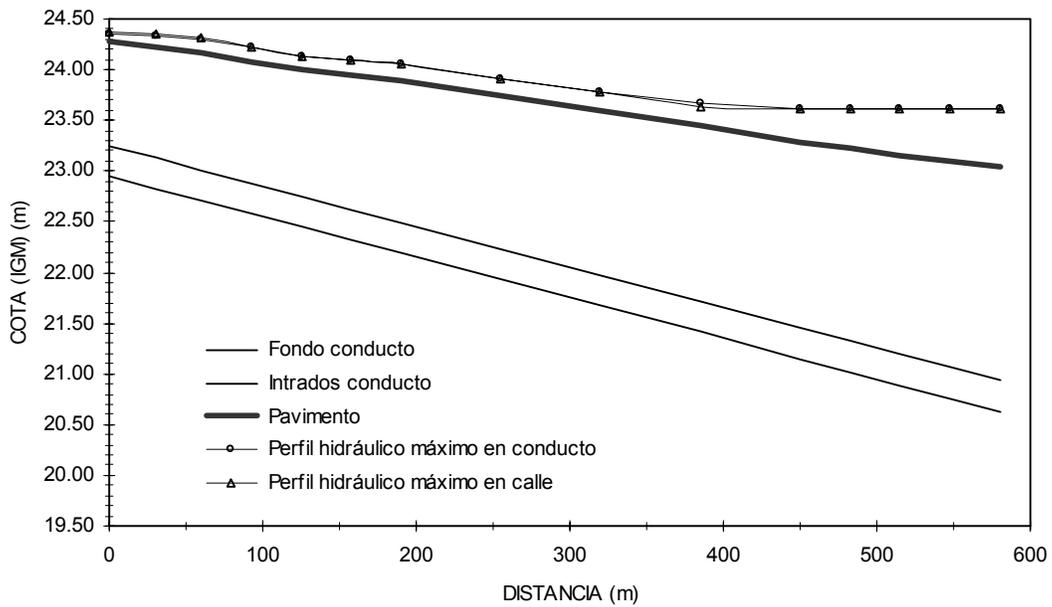


(a)

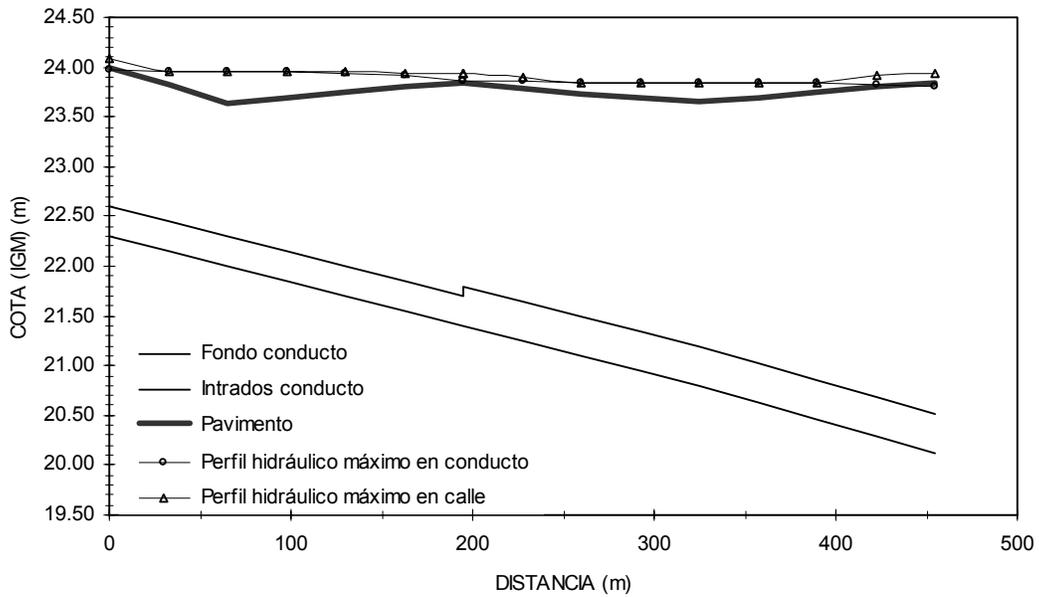


(b)

**Figura 16. Perfiles de cotas máximas. Tormenta de diseño  $P=45$  mm**  
**(a) Conducto Principal Pasco; (b) Colector Cafferata**

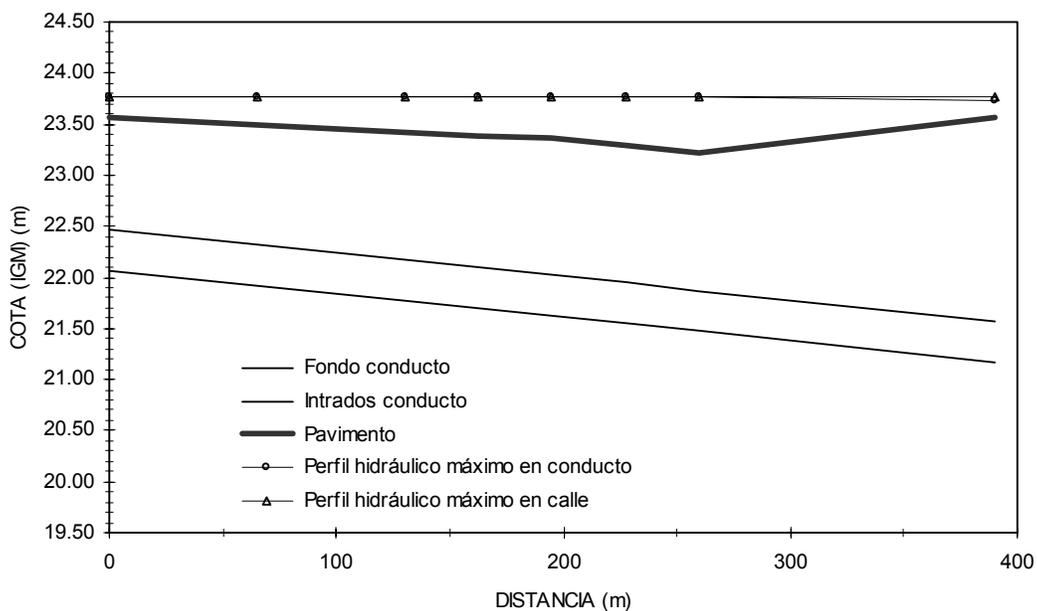


(a)

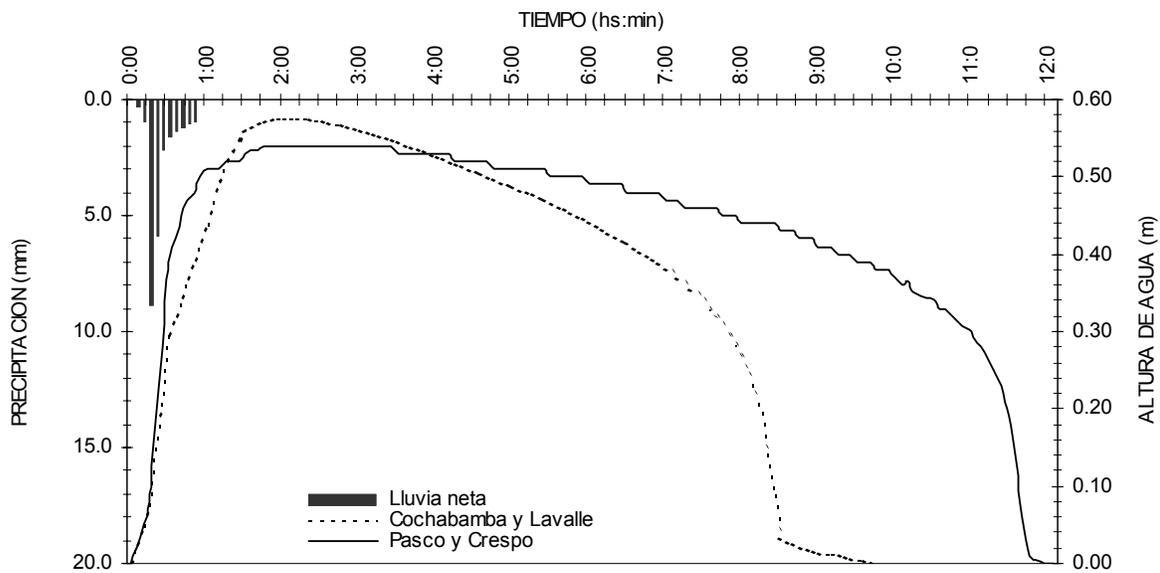


(b)

Figura 17. Perfiles de cotas máximas. Tormenta de diseño P= 45 mm  
 (a) Colector Avellaneda; (b) Colector Castellanos



**Figura 18. Perfiles de cotas máximas. Tormenta de diseño P= 45 mm  
Colector Crespo**



**Figura 19. Variación de alturas de agua en esquinas**

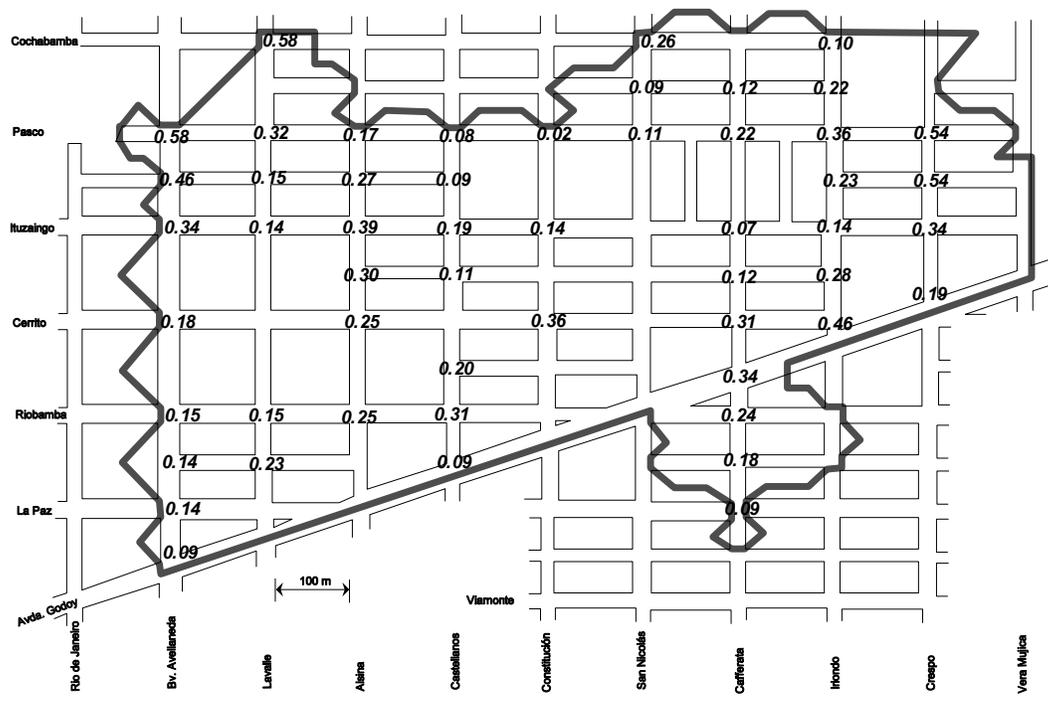


Figura 20. Alturas máximas de agua (m) en esquinas con sumideros