

DETEM 2017 Tafí Viejo

Creación de un centro de gestión y monitoreo hidrometeorológico para la implementación de medidas de protección de la población del Municipio de Tafí Viejo ante excedentes hídricos

Informe final

San Miguel de Tucumán, 5 de agosto, 2022

Indice

PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	3
ESQUEMA DE SITUACIÓN	4
COMPONENTES ESENCIALES DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE INUNDACIÓN ADECUADO PARA TAFÍ VIEJO	5
El modelo hidrológico	5
El centro de control	6
COMPILACIÓN Y SÍNTESIS DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS	7
Modelos de precipitación	8
MAPEO DE LA CUBIERTA VEGETAL Y DISTRIBUCIÓN DE SUELOS	10
Ensayos de infiltración	11
DELINEACIÓN DE CUENCAS	12
ESTIMACIÓN DE CAUDALES	14
cuenca 1	14
cuenca 2	16
cuenca 3	18
cuenca 4	19
cuenca 5	20
cuenca 6	21
Estimación de caudales y tiempos de concentración al pie del faldeo	23
cuenca 1 simple	24
cuenca 1 múltiple	25
cuenca 2 - Evento Feb12, 2001.	30
cuenca 3 - Evento Feb12, 2001 (cuenca única)	31
cuenca 4 - Evento Feb12, 2001	32
cuenca 5 - Evento Feb12, 2001 (cuenca única)	33
cuenca 6	34
CONSIDERACIONES FINALES	40
CONCLUSIONES	42
AGRADECIMIENTOS	43
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	44

Presentación del problema

El ejido municipal de Taquí Viejo se extiende de oeste a este desde las cumbres de la sierra de San Javier hasta el piedemonte (Figura 1). El sector occidental está mayormente cubierto por bosque nativo, localmente perturbado por cultivos de citrus. Al este del quiebre de pendiente hay mayor intervención y desaparece el bosque. La urbanización de Taquí Viejo ocupa una fracción del piedemonte, en el sector oriental del municipio. El régimen de lluvias se caracteriza por tormentas de corta duración y alta intensidad, concentradas entre diciembre y abril. Las precipitaciones sobre el faldeo serrano dan lugar a escurrimiento superficial que se traslada rápidamente al piedemonte, donde suele unirse a caudales generados por la lluvia sobre el mismo piedemonte. La consecuencia de la afluencia estacional de agua ha sido reiterados daños a la propiedad pública y privada acompañando el crecimiento urbano de Taquí Viejo durante las pasadas décadas.

La respuesta a esta amenaza, en general en Tucumán, y no sólo para Taquí Viejo, ha sido construir canales. Entre 1935 y los años 70 se construyó en enjambre de canales. Cada canal se construyó para paliar una amenaza puntual, dando lugar a una red de canales inadecuadamente sistematizada. El fijar toda la atención en la construcción de canales quizás relativizó el acceso a otros recursos. Por ejemplo, diversos proyectos contemplaron la excavación de lagunas de detención, pero aparentemente ninguna fue ejecutada. Tampoco se propició modificar el diseño arterial urbano de manera de retardar y desviar el escurrimiento con el fin de aliviar el caudal de ingreso a los canales.

En la actualidad las opciones de defensa hídrica se han restringido fuertemente. La planta urbana está consolidada, excepto por emprendimientos sobre el faldeo, y la disponibilidad de fondos para canales nuevos, y aun para reparar los existentes, es sumamente escasa.

El presente proyecto DETEM Taquí Viejo ofrece una actualización de la carga hídrica proveniente del faldeo serrano con dos objetivos. Uno es determinar si es recomendable instalar un sistema de alerta temprana de excedente hídrico. Tal sistema de alerta no resuelve el problema, claro está, pero brindaría un paliativo. El otro objetivo es determinar si los caudales serranos por sí solos exceden la capacidad de traslado de los canales existentes. En otras palabras, si los desbordes que ocasionalmente ocurren en diversos sitios urbanos pueden atribuirse exclusivamente, o al menos principalmente, al aporte serrano. La respuesta a esta pregunta permitirá decidir si las futuras intervenciones deberían enfocarse en controlar el escurrimiento serrano.

Esquema de situación

La Figura 1 muestra el emplazamiento del Municipio de Taí Viejo en la provincia de Tucumán. El ejido municipal se extiende desde las cumbres de la sierra de San Javier, en el oeste, hasta la llanura pedemontana en el este.

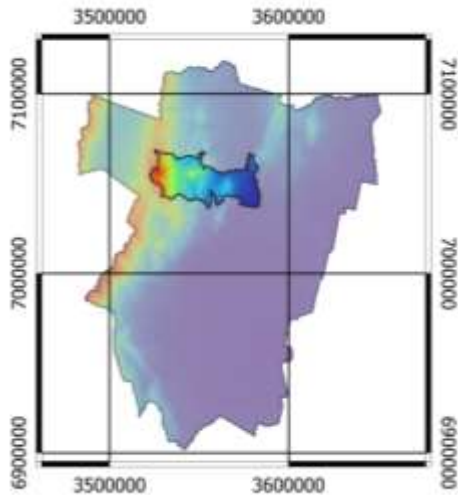


Figura 1 - Ubicación del Municipio de Taí Viejo sobre un modelo digital de elevación como fondo.

El propósito del estudio fue cuantificar el escurrimiento superficial del faldeo serrano con incidencia en el Municipio de Taí Viejo. La Figura 2 muestra las cuencas hídricas estudiadas y el sistema de canales que drena Taí Viejo.

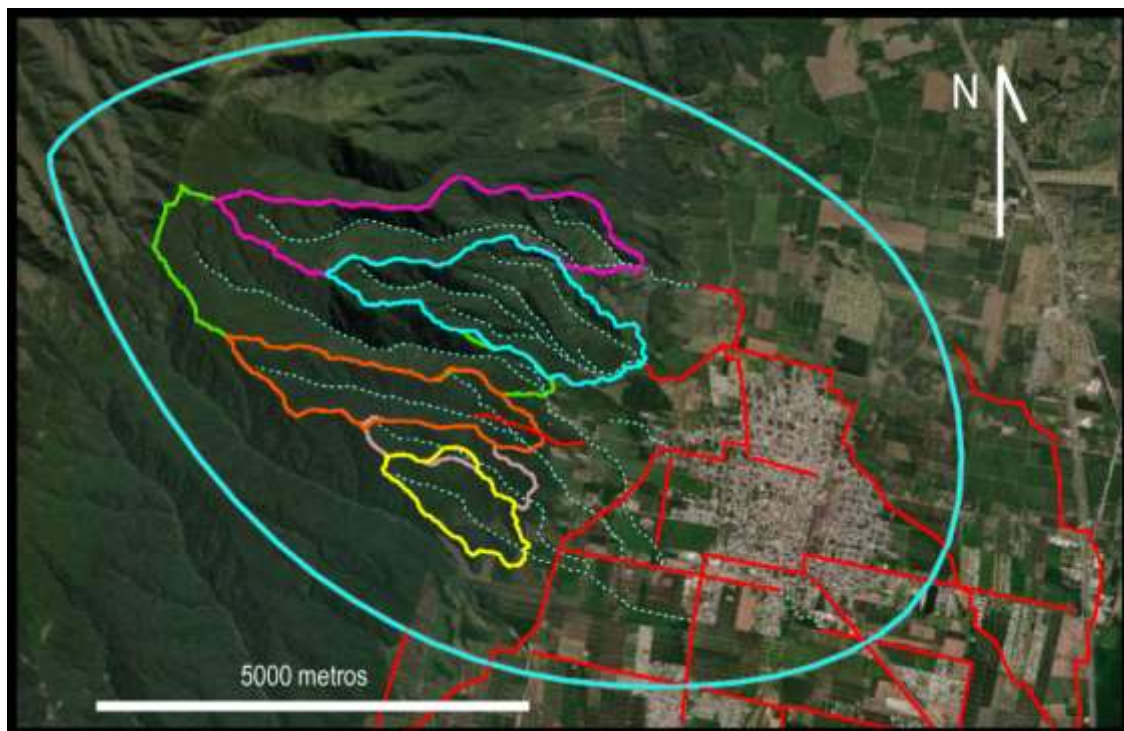


Figura 2 – Red de drenaje y sistema de canales con injerencia sobre la zona urbana de Taí Viejo.

Componentes esenciales de un sistema de alerta temprana de inundación adecuado para Tafí Viejo

La región de Tafí Viejo está sometida a lluvias torrenciales concentradas en los meses de verano. Los caudales pluviales son evacuados a través de dos sistemas hidrológicos contrastantes implantados, respectivamente, en el faldeo de la sierra de San Javier y en el piedemonte que alberga la urbanización de Tafí Viejo. En el faldeo de la sierra de San Javier el agua escurre por cauces naturales de pendiente alta y moderada, marginados por laderas cubiertas por bosque. En el piedemonte el escurrimiento se traslada mayormente por canales artificiales y cauces modificados, a través de zonas de baja pendiente que en gran proporción están impermeabilizadas por la urbanización. Un sistema de alerta temprana de inundación debe tomar en cuenta estos dos sistemas hidrológicos. El presente proyecto, sin embargo, solamente considera el sistema del faldeo, posponiendo para un proyecto futuro la inclusión del sistema pedemontano.

Un sistema de alerta temprana de inundación adecuado al régimen pluviométrico y a la topografía que caracterizan la región de Tafí Viejo es particularmente exigente, principalmente debido a que el tiempo disponible entre la emisión de la alerta y la implementación de las medidas de emergencia suele ser corto. Esta restricción requiere optimizar la detección del umbral de alarma, es decir, en qué momento el sistema debe emitir una alarma y qué nivel de emergencia deberá tener esa alarma. En un sistema hidrológico de llanura la calibración de la alarma puede recurrir a tres parámetros: tasa de precipitación, volumen de precipitación y nivel de agua en cauces y canales. En el caso del faldeo de la sierra de San Javier sólo se puede recurrir a la tasa de precipitación; basar el disparo de la alarma en el nivel de agua en los canales naturales reduciría mucho el tiempo de acción, ya que mediría el paso de la creciente por el sitio de medición, es decir, cuando una porción significativa del escurrimiento en laderas se ha concentrado en cauces.

Por lo expuesto, un sistema de alerta temprana para el sistema hidrológico del faldeo de la sierra de San Javier requiere tres componentes:

- a) Un modelo hidrológico robusto para las cuencas en el faldeo,
- b) Un centro de control con capacidad para ejecutar el modelo y decidir el nivel de alerta pertinente.
- c) Instrucción de las autoridades de defensa civil y la población en general sobre las medidas a tomar.

Se desarrollan expeditivamente los conceptos a y b. El c será implementado por el Municipio de Tafí Viejo y Defensa Civil Provincial.

El modelo hidrológico

El modelo hidrológico debe estimar el caudal superficial a la salida de la cuenca. Para este fin, en el área de interés deben implantarse un número suficiente de pluviógrafos automáticos con comunicación en tiempo real con el centro de control, dado que la tasa de precipitación es el parámetro dominante en el cálculo del riesgo hídrico.

Adicionalmente, se requiere implantar caudalímetros automáticos a la salida de las cuencas mayores para calibrar el modelo y obtener una correcta representación de la tasa de infiltración y retención de agua.

El centro de control

En el centro de control se ha de procesar la información de lluvia, ejecutar el modelo hidrológico, evaluar el riesgo en base a umbrales preestablecidos, y emitir las alertas correspondientes.

- La ejecución del modelo hidrológico debe ser automática, gatillada por un umbral en la tasa y/o profundidad de la precipitación.
- El centro de control será responsable de establecer el número y los intervalos entre los umbrales de alerta y de emitir las alertas cuando sea pertinente.
- Una vez establecidos, dichos umbrales deberán ser difundidos entre el personal responsable y expuestos a la vista en la sala de control.
- Una dotación permanente debe mantener actualizado un mapa con zonas de riesgo y diseñar estrategias de comunicación con defensa civil y con la población.
- La dotación mínima debe cubrir tres turnos de trabajo. No obstante, no es necesario que se haga guardia permanente. El principio de alerta se disparará cuando comience la lluvia en el faldeo. A partir de ese momento deberá iniciarse la guardia y atender una posible escalada.
- El centro de control será responsable del mantenimiento de equipos en el predio del centro y del instrumental instalado en terreno.

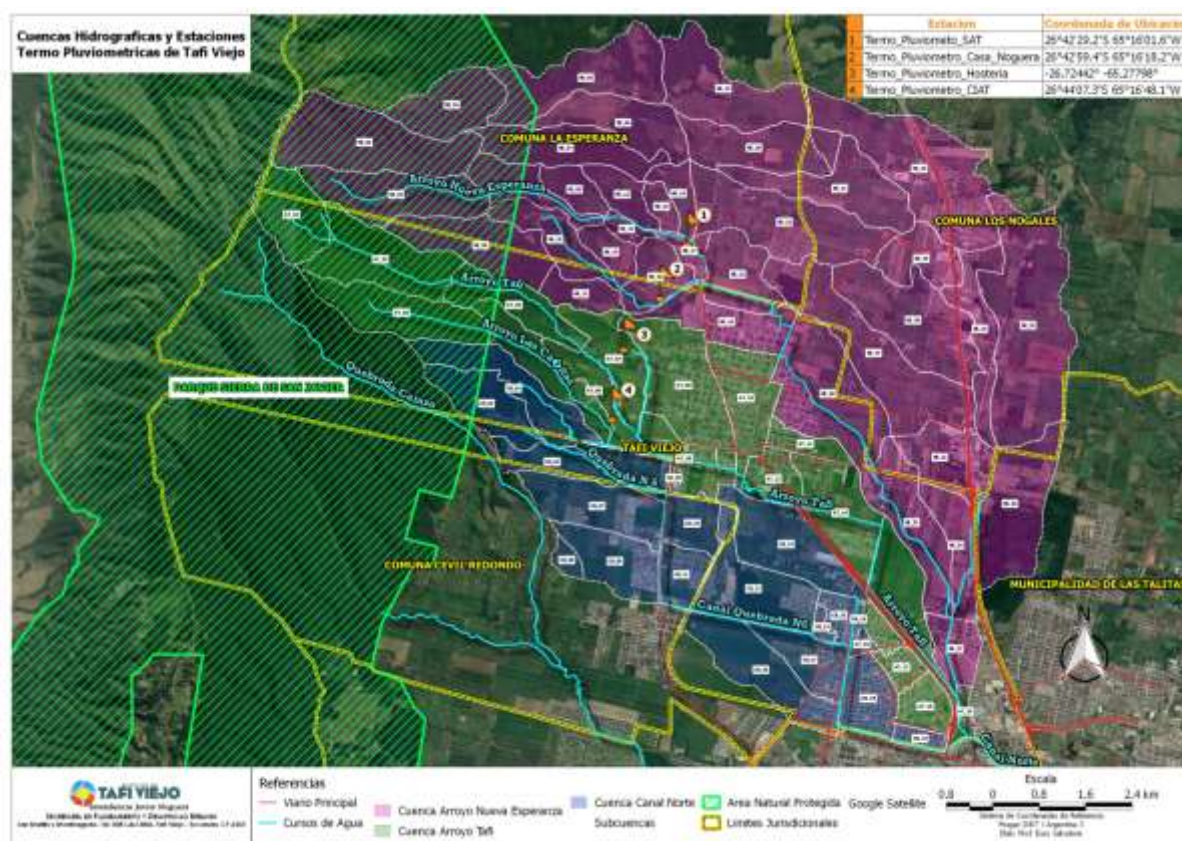
La implementación de un sistema de alerta temprana para eventos de elevada intensidad y corta duración, en cuencas de tiempo de concentración relativamente bajos, plantea un significativo desafío. En general, una alerta con menos de una hora de anticipación es insuficiente, dado el tiempo requerido para la reacción, comunicación e implementación de medidas de prevención en terreno. En China se han implementado sistemas de alerta de 1 hora regionalmente con éxito (Liu y otros, 2018) y en los Estados Unidos se ha adoptado 1 hora como el tiempo de aviso mínimo (Gourley y otros, 2012).

El proyecto a cargo de este consultor cubre el desarrollo del modelo hidrológico para las cuencas emplazadas en la ladera de la sierra de San Javier, es decir, cuencas extra-urbanas. La importante contribución de las cuencas urbanas al riesgo hídrico para Tafí Viejo no se considera en este estudio.

Compilación y síntesis de datos hidrometeorológicos

La principal fuente de información preliminar sobre datos hidrometeorológicos fue el informe para el “Plan Director para la sistematización de las quebradas del flanco oriental de la sierra de San Javier y actualización del sistema de desagües”, publicado en 2003. Los estudios de la consultora Decio Costanzi fueron consultados para los cálculos hidráulicos en el canal Cintura Norte. Adicionalmente se consultaron fuentes publicadas e inéditas, la mayor parte de las cuales figuran en la Bibliografía.

Los fondos asignados a este proyecto DETEM permitieron la adquisición e instalación de 4 termopluviógrafos. Estos instrumentos han sido ubicados a lo largo del pie del faldeo, como muestra el plano. La transmisión de datos es en tiempo real.



Ubicación de los pluviógrafos adquiridos con fondos de este DETEM.

Modelos de precipitación

El modelado hidrológico preliminar aplicó tres modelos de lluvia: a) el evento real de Febrero 12, 2001, registrado en el domicilio del Ing. Franklin Adler en Yerba Buena (el pluviómetro pertenecía a la red de mediciones de la UNT), b) una compilación de frecuencias de lluvia para una recurrencia de 20 años, basada en datos de El Colmenar 1942-1993, y c) un hietograma sintético para recurrencia 100 años derivado de curvas IDF en Bazzano (2019).

a) El evento de Feb 12 tiene una moda principal donde en 20 minutos acumula casi 50 mm de lluvia. Esta intensidad corresponde a una recurrencia de aproximadamente 20 años, según curvas IDF en Bazzano (2019). La duración de 13 horas de este evento es larga en comparación con la duración media de los eventos de lluvia de verano. El pico de lluvia ocurrió a 0:30 horas, aproximadamente 1 hora después del inicio.

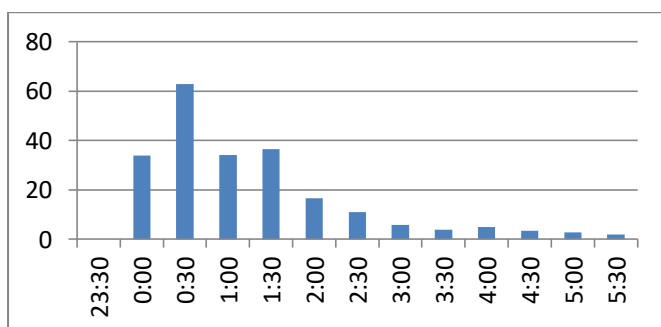


Figura 3 - Hietograma parcial del evento de Febrero 12, 2001.

b) La compilación de frecuencias de lluvia para 20 años fue tomada del informe para canales en Yerba Buena (Norte Grande Hidrica), con datos de El Colmenar 1942-1993. Se adoptó este modelo bajo la presunción de que la duración de 60 minutos podría representar mejor las tormentas típicas en la zona.

Duracion (min)	I (mm/hora)	Incremental
5.00	275.00	22.92
10.00	199.00	
15.00	154.00	38.50
20.00	137.00	
30.00	108.00	
45.00	84.00	
60.00	69.00	69.00

c) El hietograma sintético para recurrencia 100 años se muestra abajo. El pico de lluvia es menor que el del evento de Febrero 12, 2001.

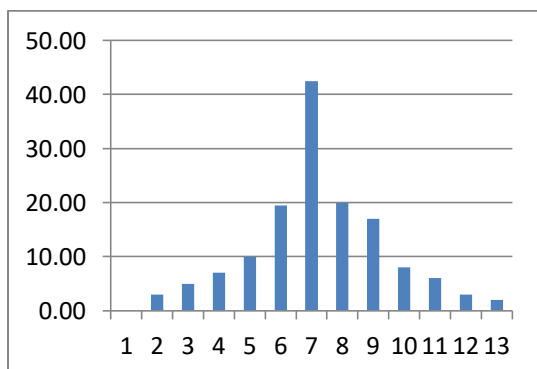


Figura 4 - Hietograma sintético para recurrencia 100 años.

Simulaciones con los tres modelos indican que la tormenta de Febrero 12, 2001, dio lugar a los mayores caudales. Esta conclusión coincide con la de los redactores del Plan Director, Capítulo Hidrología (pág. 52): “Estudiando minuciosamente los resultados obtenidos se encontró que la tormenta ocurrida el 12 de Febrero de 2001 y registrada en la estación Yerba Buena de la UNT se presenta como la más desfavorable en su distribución y monto total. Se han encontrado otras tormentas con distribución temporal muy desfavorable, pero su monto total es de menor cuantía.” En consecuencia, conservadoramente se adoptó esta tormenta como modelo de precipitación para las simulaciones.

El presente estudio incluyó la hipótesis de que el tamaño de la tormenta núcleo tenga la escala de las cuencas, y en tal caso, la migración del núcleo se traduciría en un desfase temporal del pico de tormenta entre cuencas (ver Modelos de tormenta en la propuesta original). El Plan Director, Capítulo Hidrología (pág. 54), tomó en cuenta esta hipótesis y dice: “Con el fin de determinar la condición de uniformidad espacial de las tormentas, a adoptar en el en el área de estudio considerada (léase subcuenca, sistema de cuencas o área total de estudio), se analizaron más de 20 eventos intensos abatidos sobre el área, representados mediante isohietas de montos totales en 24 horas.” Y continúa “Se han encontrado tormentas registradas que abarcan áreas con diámetros de hasta 8 a 10 km. con monto total uniforme (superficie abarcada de 50 a 80 km²), como situación más desfavorable” (pág. 54, Plan Director, Capítulo Hidrología).

Dado que la distancia que separa la cuenca 1 de la cuenca 6 es de unos 5 km, es razonable suponer que un mismo núcleo de tormenta afecte simultáneamente las seis cuencas relevadas. De hecho, una circunferencia con centro en el área de interés, o sea, el conjunto de cuencas, y radio 2500 metros abarca la totalidad de las cuencas relevadas. En conclusión, sin descartar una variación en el volumen de precipitación a medida que el núcleo se traslada a lo largo del faldeo, este efecto es indeterminable con la actual cobertura de pluviógrafos.

Mapeo de la cubierta vegetal y distribución de suelos

Los distintos tipos de cobertura del terreno, o usos de la tierra, en las cuencas relevadas se clasificaron en seis categorías: pastura, caminos, zonas urbanizadas (de baja densidad), zonas con suelo expuesto, zonas de cultivo de citrus, y zonas de bosque nativo. El bosque nativo cubre la mayor parte de la superficie relevada. La distribución de estas coberturas se delimitó en Google Earth Pro y se trasladó a ArcMap para el cálculo de superficies y proporciones. Los mapas en esta sección muestran las subdivisiones reconocidas. La columna Cubierta en tabla abajo indica las categorías de uso de la tierra que fueron tomadas en cuenta. En esta misma tabla, las columnas indicadas con A, B, C y D corresponden a los grupos hidrológicos, y los valores corresponden a los curva número asignados a cada categoría en USACE (2022).

Tabla de curva número en función del grupo hidrológico

Id	Cubierta	A	B	C	D
1	pastura	49	69	79	84
2	camino	72	82	87	89
3	urbano (1/2 densidad)	57	72	81	86
4	suelo	77	86	91	94
5	citrus (cultivo en filas)	70	79	84	88
6	bosque	36	60	73	79
7	cultivo (small grain)	63	75	83	87

La distribución de tipos de suelo fue tomada de Cruzate y otros (2005) y de Sanzano y Fernández de Ullivarri (2020). Dos tipos de suelo cubren la zona de interés: Hapludol, aguas arriba (identificado con 14, en el Mapa de distribución de suelos) y Argiudol, más arcilloso, aguas abajo (en blanco en el Mapa de distribución de suelos; Figura 5). Las cuencas 1, 3 y 4 incluyen ambos tipos, las restantes están restringidas al tipo argiudol. En la simulación, al tipo hapludol se le asignó grupo hidrológico A, mientras que el tipo argiudol se distribuyó 50% en cada grupo A y B. El Ing. Sanzano (comunicación personal, febrero 2022) aclara que la separación entre los tipos hapludol y argiudol no es nítida, y que se encuentra argiudol en el faldeo.

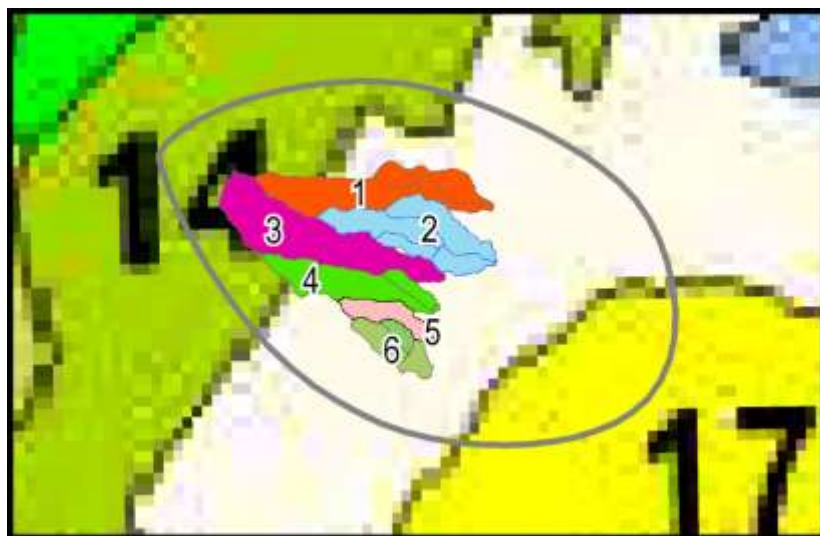


Figura 5 - Mapa de distribución de suelos y ensamblado de las cuencas relevadas. El mapa de suelos fue tomado de Cruzate y otros (2005). Hapludol predomina aguas arriba y Argiudol aguas abajo.

Ensayos de infiltración

Se hicieron cuatro ensayos de infiltración en suelos de bosque sin intervención y de pradera intervenida con cultivos. El instrumento fue un infiltrómetro de anillo y las corridas duraron dos horas y media cada una. La figura abajo muestra dos de los resultados. En la pradera las tasas de infiltración fueron de 34, 28 y 18 mm/hora, para un promedio de 27 mm/hora. En el suelo de bosque sin intervención el ensayo dio una tasa de 118 mm/hora.

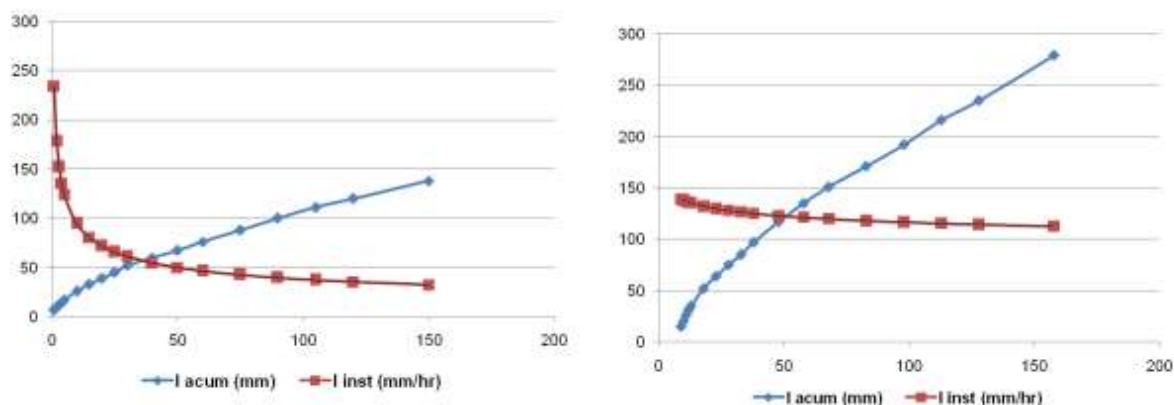


Figura 6 - Resultados de los ensayos de infiltración. Panel izquierdo: suelo de pradera intervenida. Panel derecho: suelo de bosque.

La tasa de 118 mm/hora corresponde al grupo hidrológico A y suelo Hapludol, y el promedio de 27 mm/hora al grupo hidrológico C y suelo Argiudol.

Delineación de cuencas

Se delinearon seis cuencas en el faldeo de la sierra de San Javier. La salida de todas las cuencas se estableció aproximadamente al pie del faldeo, donde todo el caudal queda restringido a un único cauce. Esto se debe a que el propósito del proyecto es determinar el aporte de caudal del faldeo al sistema de canales urbanos y semiurbanos que drenan Tafí Viejo (referirse a Actividad 6 de la propuesta original).

La delineación de las cuencas se llevó a cabo empleando el programa HEC-HMS 4.8, sobre la base de un modelo digital de elevación ALOS PALSAR con resolución 12 metros. La red de drenaje se tomó de los planos DESAFLU-P8.1.3.2.1.dwg y DESAFLU-P009.dwg en el Plan Director, Capítulo Hidrología (pág. 7). Se apreció buena coincidencia en la red de drenaje obtenida de modo manual por el Plan Director y la obtenida de modo automático aplicando HEC-HMS. Las cuencas se han numerado consecutivamente de 1 a 6 de norte a sur (Figura 7).

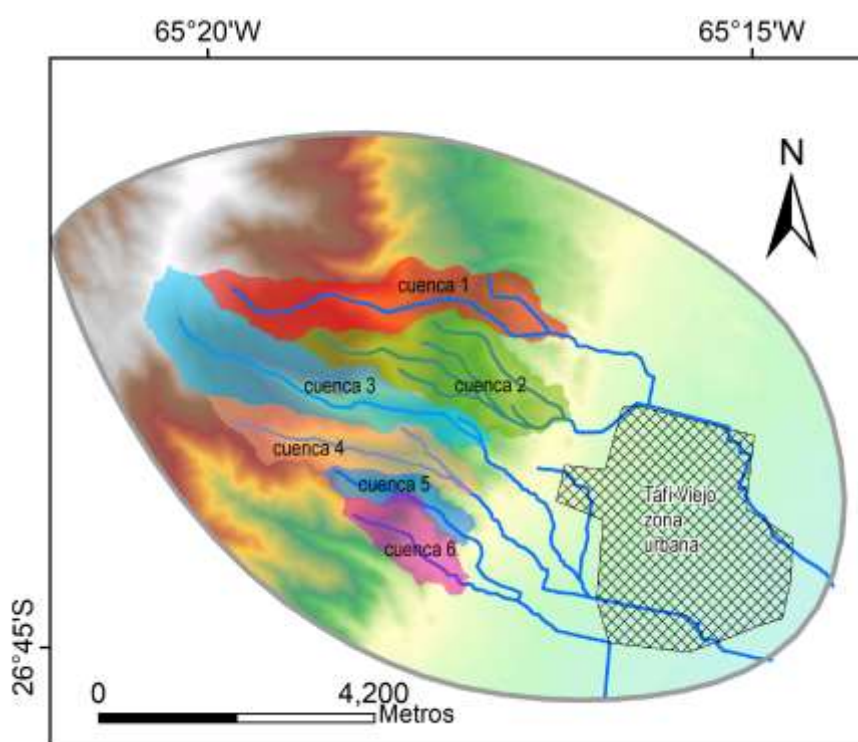


Figura 7 - Distribución de las cuencas relevadas.

La cuenca 1 es recorrida por el arroyo Nueva Esperanza, que se extiende aguas abajo del cierre de la cuenca ocupando el canal Nueva Esperanza. El caudal de la cuenca 2 es drenado por el arroyo Cochuchal y afluentes, y es captado por el canal Cintura Norte que luego de un corto recorrido confluye en el canal Nueva Esperanza. La cuenca 3 es drenada por un arroyo que conduce al canal Arroyo Tafí. La cuenca 4 corresponde al arroyo Las Cañitas y desagua también en el canal Arroyo Tafí. La cuenca 5 corresponde al arroyo Quebrada N°6, que confluye en el canal del Oeste. El caudal de la cuenca 6 confluye con el arroyo Quebrada N°6 y desagua en el canal del Oeste (Figuras 8 y 9).

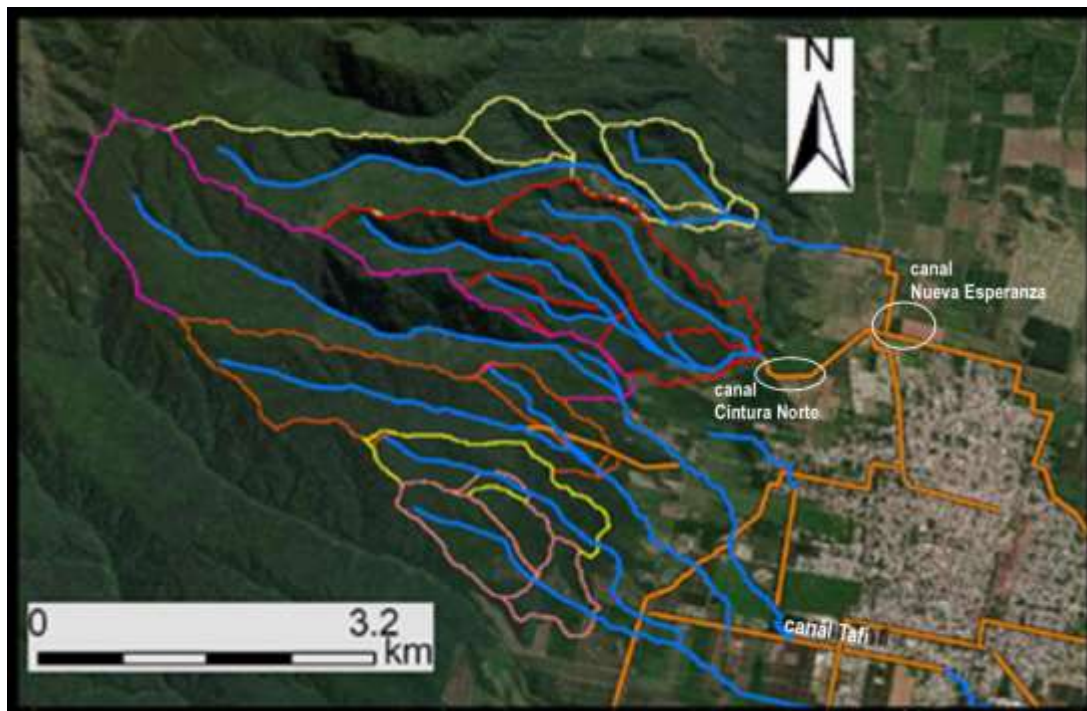


Figura 8 - Ubicación de las cuencas relevadas sobre una imagen de Google Earth. Se muestra la red de drenaje, incluyendo canales (en marrón), que desaguan los caudales.

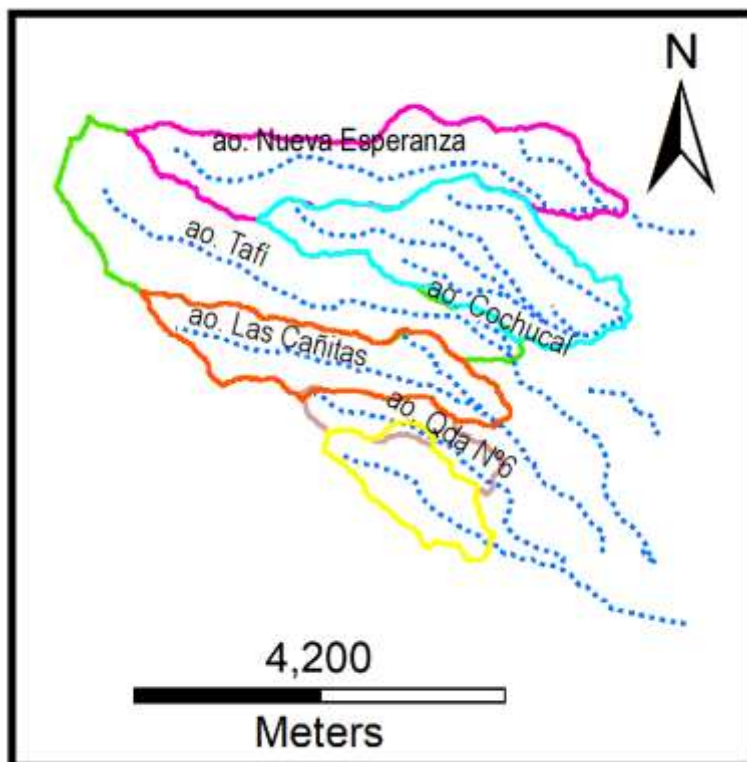


Figura 9 - Nomenclatura de los cauces principales.

Estimación de caudales

Las cuencas 1, 2, 4 y 6 fueron subdivididas en subcuencas con el propósito de tomar en consideración de manera más eficiente la variación en la permeabilidad del suelo y/o cambios en la cubierta vegetal. Una subdivisión no se justifica para las cuencas 3 y 5. En el caso de la cuenca 3 debido a que tiene una superficie pequeña. En el caso de la cuenca 5 debido a que cae enteramente en zona de bosque y éste es el factor hidrológico dominante, por encima de la variación textural entre los suelos Hapludol y Argiudol.

El tiempo de concentración, T_c , es estimado empleando la siguiente ecuación:

$$T_c = 2.2 \left(\frac{L * L_c}{\sqrt{S_{10-85}}} \right)^{0.3}$$

donde L – flujo más largo, L_c – flujo desde el centroide, S_{10-85} – gradiente medio entre los puntos correspondientes al 10 y al 85% del flujo más largo.

Parámetros hidrológicos de las cuencas y subcuencas

En esta sección se definen los parámetros que se emplean en las simulaciones posteriores.

cuenca 1

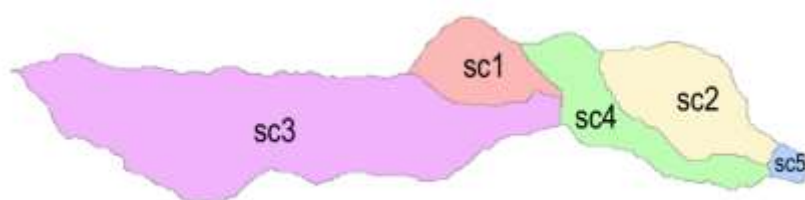


Figura 10 - Subdivisión en subcuencas.

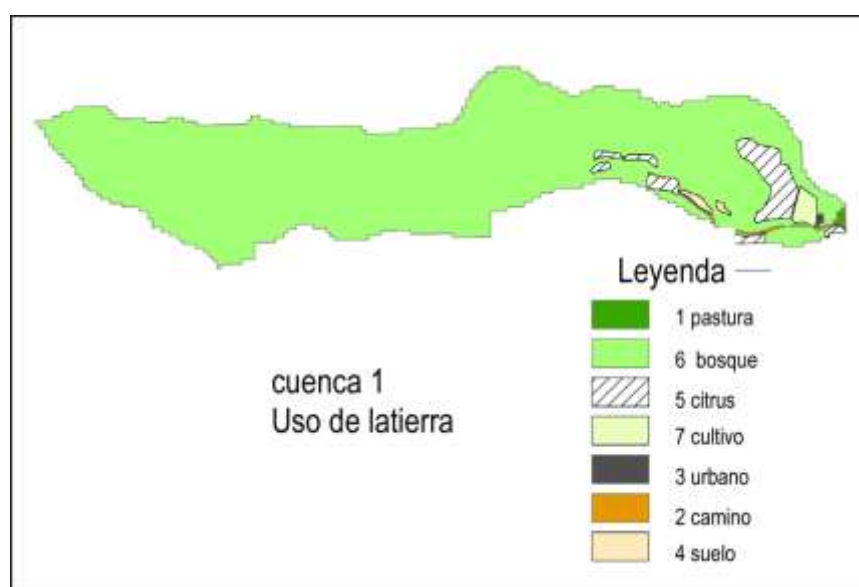


Figura 11 - Distribución de los usos de la tierra.

cuenca 1 Distribución de suelos



Figura 12 - Distribución de suelos.

Cuenca 1 – subcuencas múltiples

Area total 3.98 km²

Subc.	Area	Tc (h)	R (h)	Tramo	Lag(min)	CN
sc3	2.35	1.19	0.51			41.3
sc1	0.41	0.58	0.25			48
sc2	0.65	0.71	0.31			44.7
sc4	0.54	0.91	0.39	r2	33	61.8
sc5	0.06	0.29	0.12	r1	10.5	69

Cuenca 1 – sin subcuencas

Se hizo una corrida sin subdividir en subcuencas con el propósito de comparar ambas geometrías.

Area total 3.98 km²

Subc.	Area	Tc (h)	R (h)	Tramo	Lag(min)	CN
sc1	3.98	1.49	0.64			46

cuenca 2



Figura 13 - Subdivisión en subcuencas.

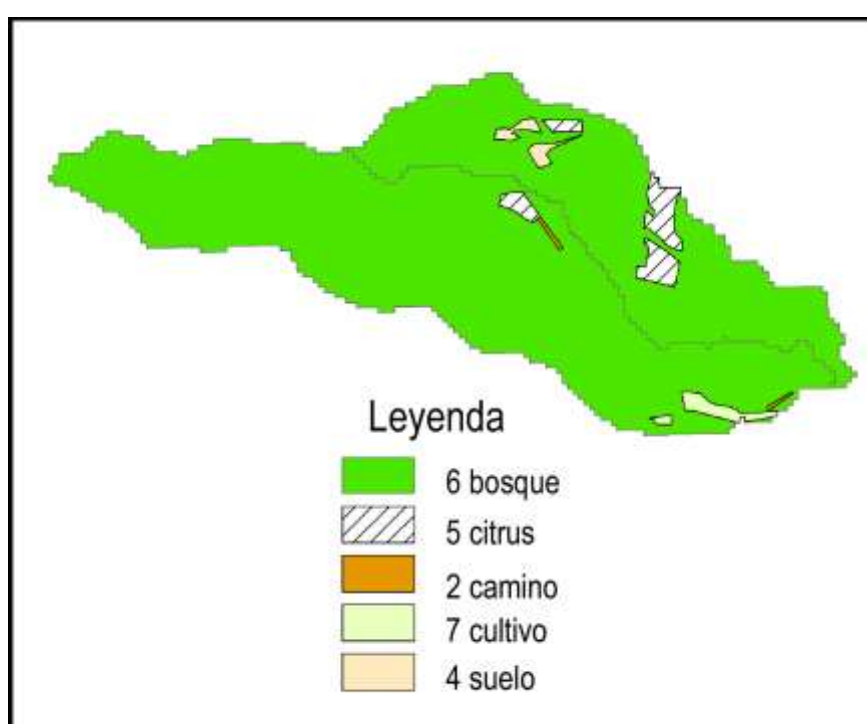


Figura 14 - Cuenca 2 – Uso de la tierra



Figura 15 - Distribución de suelos.

Cuenca 2 - subcuencas múltiples

Area total 3.85 km²

Subcuencas	Area	Tc (h)	R (h)	Tramo	Lag (min)	CN
sc2	1.43	0.996	0.43			51.7
sc3	0.42	0.68	0.29			48
sc1	1.42	1.09	0.47			50.3
sc4	0.58	0.78	0.34	r2	28	49.2
sc5	0.003	0.18	0.08	r1	6	48

Cuenca 2 - sin subcuencas

Se hizo una corrida sin subdividir en subcuencas con el propósito de comparar ambas geometrías.

Area total 4.04 km²

Subcuencas	Area	Tc (h)	R (h)	Tramo	Lag (min)	CN
sc2	4.04	1.28	0.55			50

cuenca 3

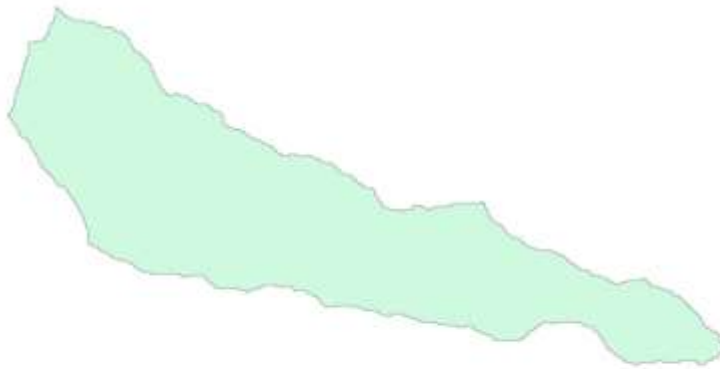


Figura 16 - Cuenca única.



Figura 17 - Distribución de usos de la tierra.



Figura 18 - Distribución de suelos.

Area total 4.91 km²

Subcuencas	Area	Tc (h)	R (h)	Tramo	Lag (min)	CN
sc1	4.91	1.58	0.68			41.6

cuenca 4



Figura 19 - Subdivisión en subcuencas.

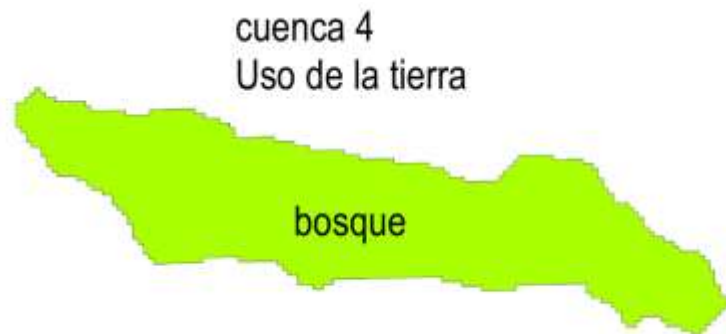


Figura 20 - Distribución de usos de la tierra.



Figura 21 - Distribución de suelos.

Area total 2.65 km²

Subcuencas	Tc (h)	R (h)	Tramo	Lag (min)	CN
sc1	1.27	0.54			45.5
sc2	0.65	0.28			48
sc3	0.2	0.09	r1	7.2	48

cuenca 5



Figura 22 - Cuenca única.



Figura 23 - Distribución de usos de la tierra.



Figura 24 - Distribución de suelos.

Area total 1.03 km²

Subcuencas	Area	Tc (h)	R (h)	Tramo	Lag (min)	CN
sc1	1.03	0.87	0.37			48

cuenca 6

Cuenca 6
División en subcuencas



Figura 25 - Subdivisión en subcuencas.

Cuenca 6
Uso de la tierra

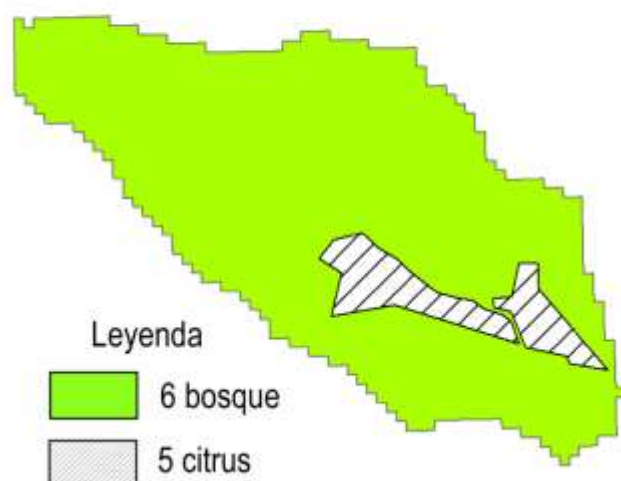


Figura 26 - Distribución de usos de la tierra.



Figura 27 - Distribución de suelos.

Area total 1.47 km²

Subcuencas	Area	Tc (h)	R (h)	Tramo	Lag (min)	CN
sc1	0.68	0.64	0.28			50.5
sc2	0.38	0.62	0.29			48
sc3	0.41	0.57	0.26	r1	20.6	52.2

Estimación de caudales y tiempos de concentración al pie del faldeo

En la modelización hidrológica se empleó el programa HEC-HMS 4.8 con los siguientes métodos:

- Flujo base nulo - justificado por la corta duración de los eventos de tormenta de verano.
- Pérdida por el método SCS CN - En todas las corridas preliminares de modelización hidrológica se supuso que el suelo estaba saturado al iniciarse la lluvia, por lo cual no hubo infiltración inicial. Esta condición fue recomendada en el informe de Plan Director, Capítulo Hidrología: **“El mismo método recomienda se adopte para diseño de obras de evacuación la condición más desfavorable, es decir la condición III (Húmeda) (pág. 59).**
- Transformación HU de Clark - el tiempo de concentración T_c se calculó empleando funciones de cálculo en HEC-HMS, y se corroboró con TR-55; el coeficiente de almacenamiento se calculó como $R=0.3/0.7 \cdot T_c$.
- Traslado por el método Lag - el retardo se calculó como $\text{lag}=0.6 \cdot T_c$.

Las cuencas 1 y 2 se modelaron como cuenca única y como cuenca con múltiples subcuencas con el propósito de evaluar la sensibilidad a una subdivisión en subcuencas.

cuenca 1 simple

Corrida 1 - Evento Feb12, 2001

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc1	34.2	420800	02:45

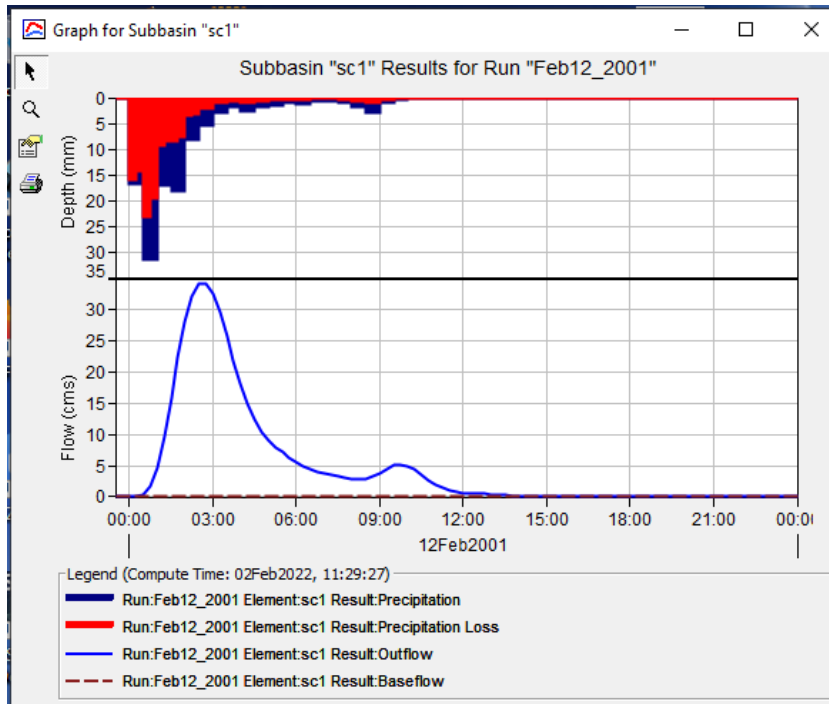


Figura 28 – Salida de HEC-HMS.

cuenca 1 múltiple

Corrida 1 - Evento Feb12, 2001 uniforme en todas las subcuencas.

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc3	19.3	222300	02:30
sc1	4.4	45300	02:00
sc2	6.4	67000	02:15
sc4	7.3	77100	02:15
sc5	1.1	9100	01:00
salida	34.3	420800	02:45

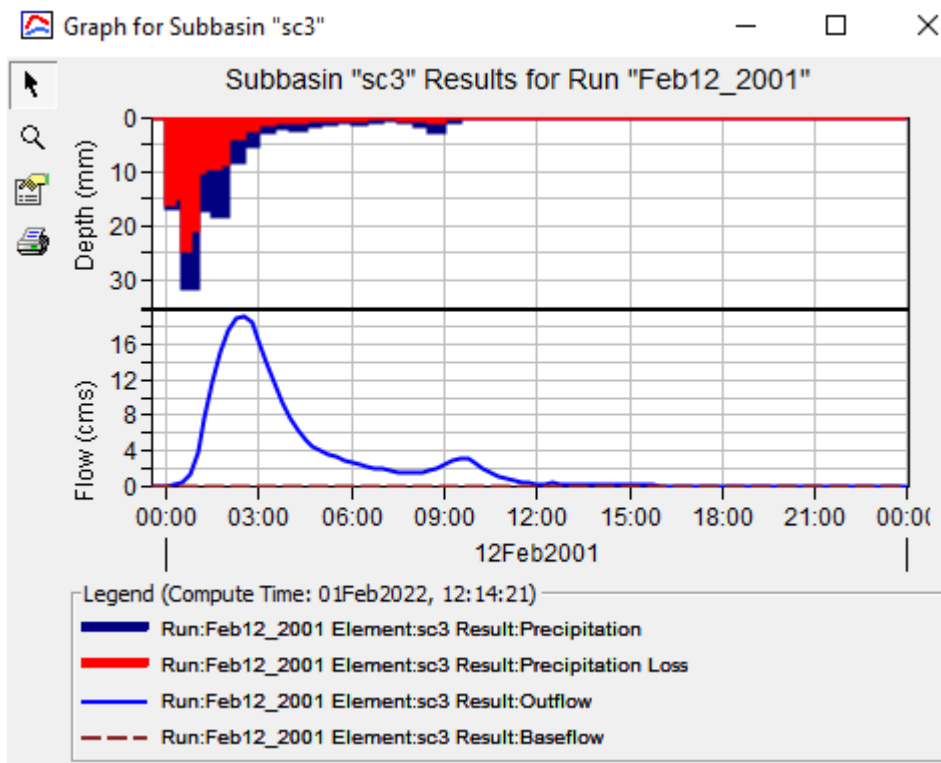


Figura 29 - Hidrograma a la salida de sc3.

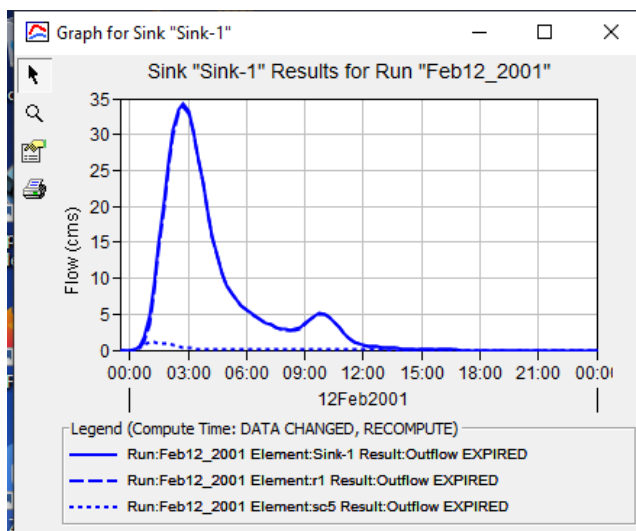


Figura 30 - Hidrograma a la salida de la cuenca.

El retardo entre el pico de la tormenta y el pico de descarga es de aproximadamente 1 hora 45 minutos.

Corrida 2 - Incremento en sc3; evento Feb12, 2001 más 10%

Datos en el informe Plan Director, Capítulo Hidrología, Cuadro en pág. 24, sugieren que la profundidad de lluvia tiende a aumentar desde el piedemonte hacia el faldeo (ver también isohietas en Paz y Lazarte Sfer. Con el propósito de simular esta situación, esta corrida aplicó un incremento uniforme del 10% en la profundidad de lluvia para la subcuenca sc3, respecto de las subcuencas inferiores.

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc3	22.5	258700	02:30
sc1	4.4	45300	02:00
sc2	6.4	67000	02:15
sc4	7.3	77100	02:15
sc5	1.1	9100	01:00
salida	37.4	45720.	02:45

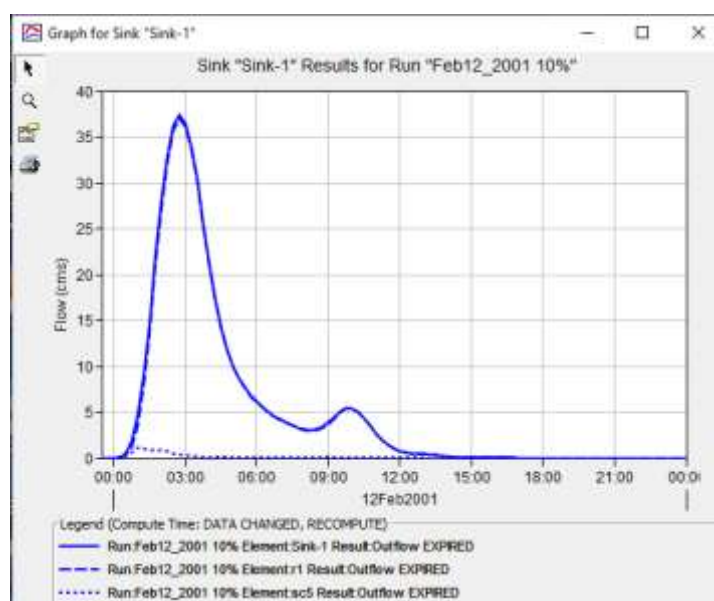


Figura 31 - Hidrograma a la salida de la cuenca.

El resultado sugiere que aumenta el caudal pero no varía el tiempo al pico.

Corrida 3 - Adelanto Feb12_2001 30 minutos para sc3.

El informe del Plan Director, Capítulo Hidrología concluyó que puede darse un desfase en el tiempo de pico de tormenta de varios minutos: **“Del análisis de 14 tormentas ocurridas en el área de estudio ha surgido una conclusión interesante, y ésta es que existe un desfase temporal en el inicio de la tormenta entre estaciones. Cuando comienza a llover en El Colmenar no ocurre lo mismo en Reserva Horco Molle, donde comienza a llover 15 minutos y hasta 30 minutos después. Lo mismo sucede si comparamos El Colmenar o Reserva con la estación Loma Bola”** (pág. 53).

DETEM 2017 Tafí Viejo

En esta corrida, para simular esta situación, se adelantó en 30 minutos el hietograma sólo para la subcuenca sc3.

Punto	Descarga pico m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc3	19.3	222300	02:00
salida	36.9	420800	02:30.

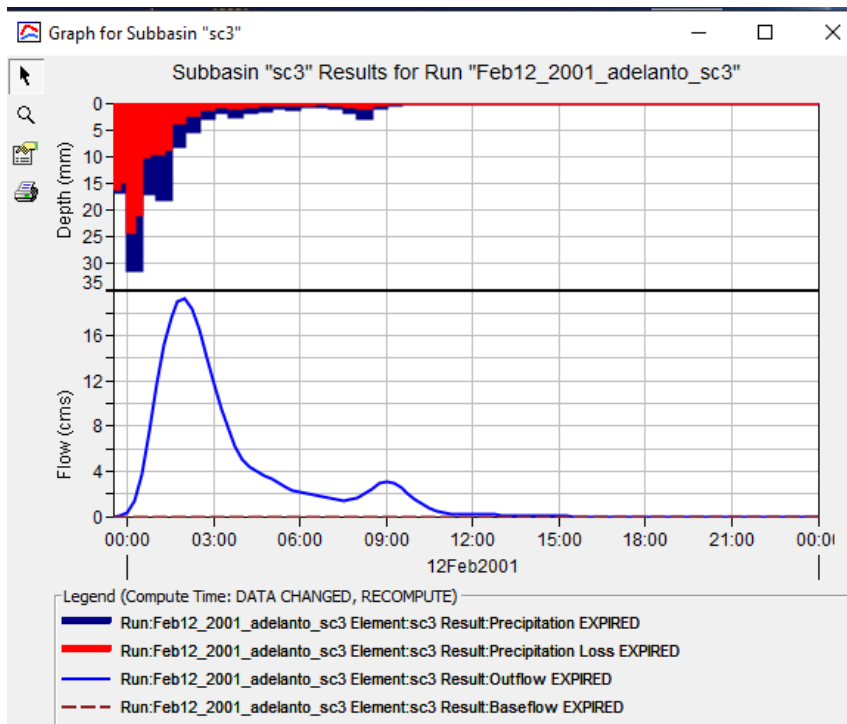


Figura 32 - Hidrograma a la salida de sc3.

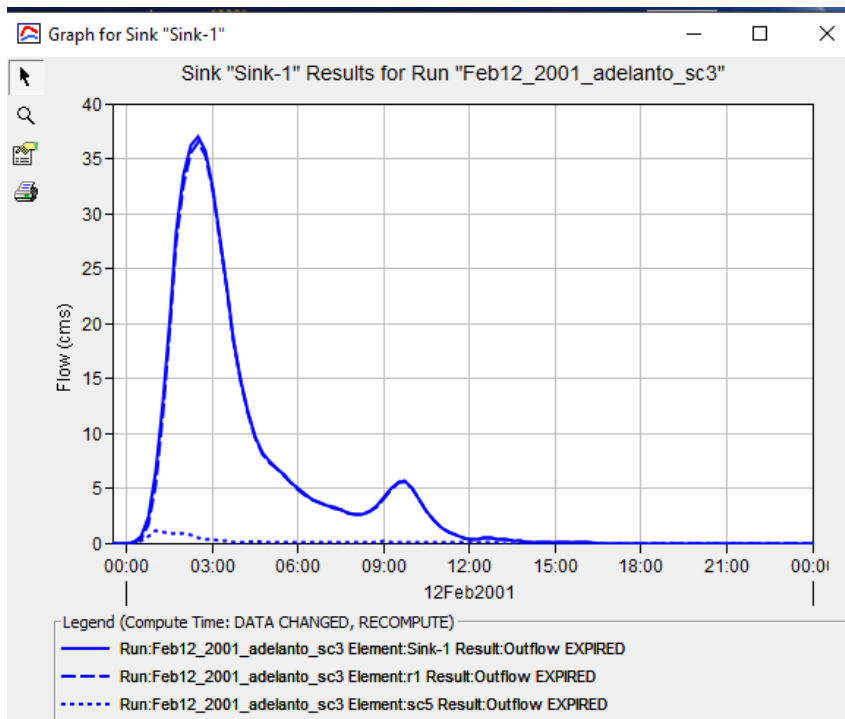


Figura 33 - Hidrograma a la salida de la cuenca.

El resultado sugiere un incremento del caudal en alrededor del 7%. El volumen de agua no varía pues se consume todo el hietograma.

Corrida 4 - Adelanto Feb12_2001 30 minutos para subcuencas aguas abajo de sc3.

Esta corrida tiene propósito idéntico a la anterior, pero el adelanto de 30 minutos del hietograma se aplicó a las subcuencas aguas abajo de sc3.

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc3	19.3	222300	02:30
salida	29.7	420800	02:30.

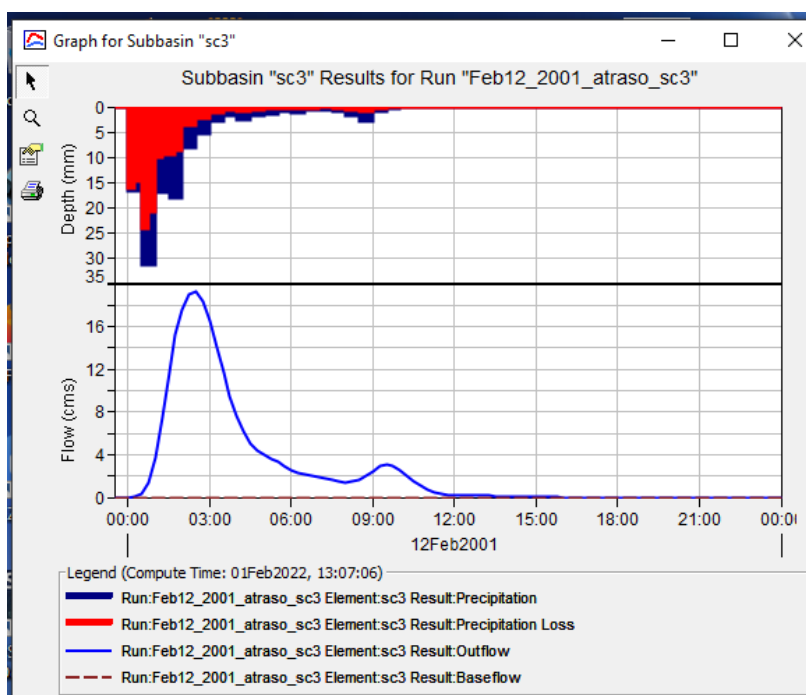


Figura 34 - Hidrograma a la salida de sc3.

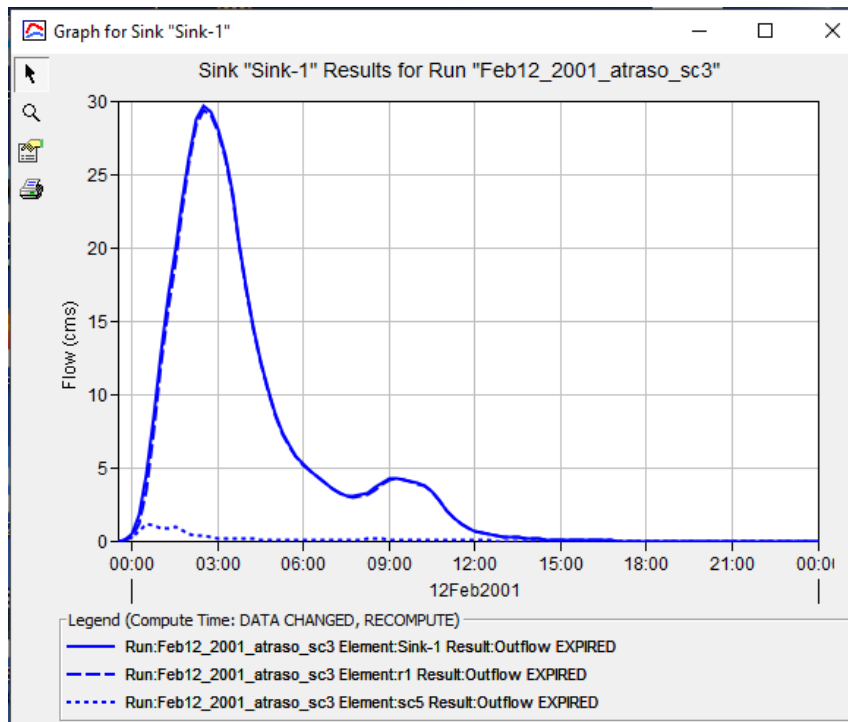


Figura 35 - Hidrograma a la salida de la cuenca.

El resultado sugiere una disminución del caudal en alrededor del 13%.

cuenca 2 - Evento Feb12, 2001.

Corrida 1 – Cuenca única

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc1	40.2	465800	02:30
salida	40.2	465800	02:30

Corrida 2 – Subcuencas múltiples

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc2	15.6	170100	02:15
sc3	4.5	46500	02:15
sc1	14.8	164700	02:15
sc4	6.2	65300	02:15
sc5	0.0	400	01:00
salida	39.9	446900	02:45

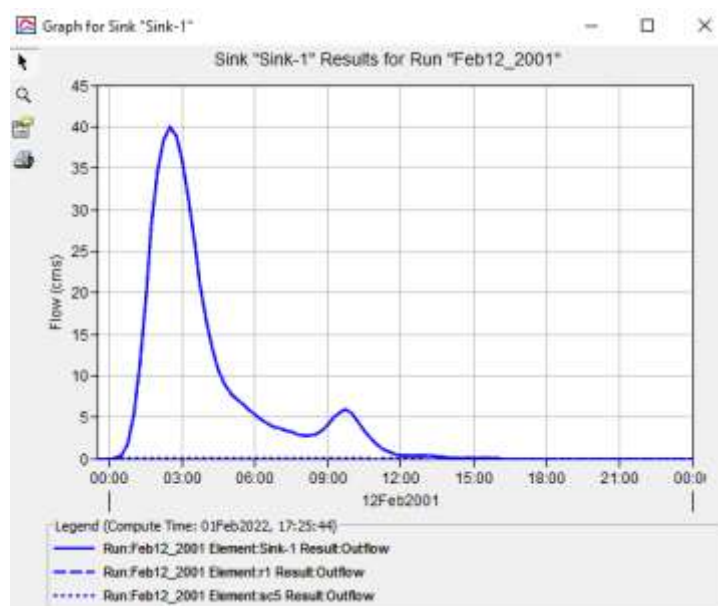


Figura 36 - Hidrograma a la salida de la cuenca.

La cuenca 2 tiene una superficie algo inferior a la cuenca 1 pero simula un caudal 16% superior y genera una descarga también mayor. El mayor caudal se atribuye a la forma menos elongada de la cuenca 2, que resulta en un menor tiempo de concentración; T_c 1.49 (cuenca 1 simple) versus T_c 1.28 (cuenca 2 simple).

cuenca 3 - Evento Feb12, 2001 (cuenca única)

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc1	37.1	467600	02:45

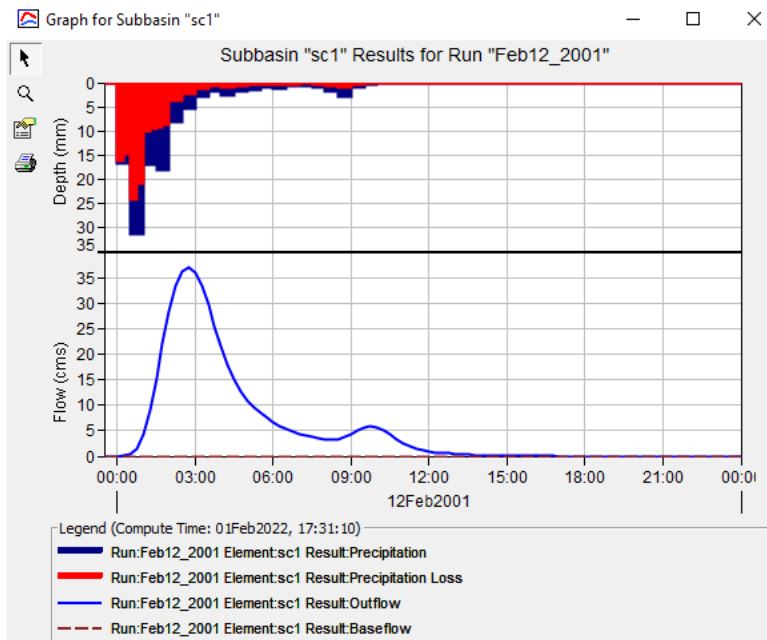


Figura 37 - Hidrograma a la salida de sc1. Vale para la salida.

cuenca 4 - Evento Feb12, 2001

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc1	19.7	228800	02:30
sc2	4.6	48300	02:15
sc3	0.3	2800	01:00
salida	24.0	279900	02:30

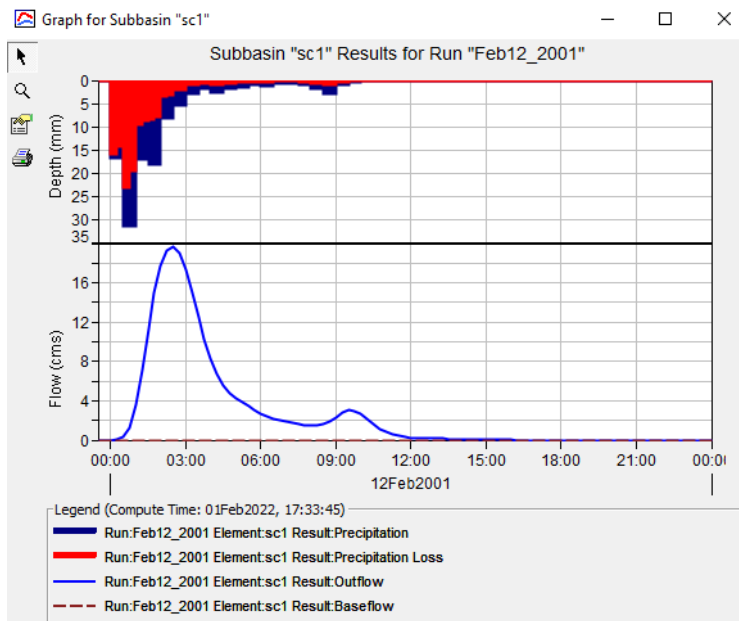


Figura 38 - Hidrograma a la salida de sc1.

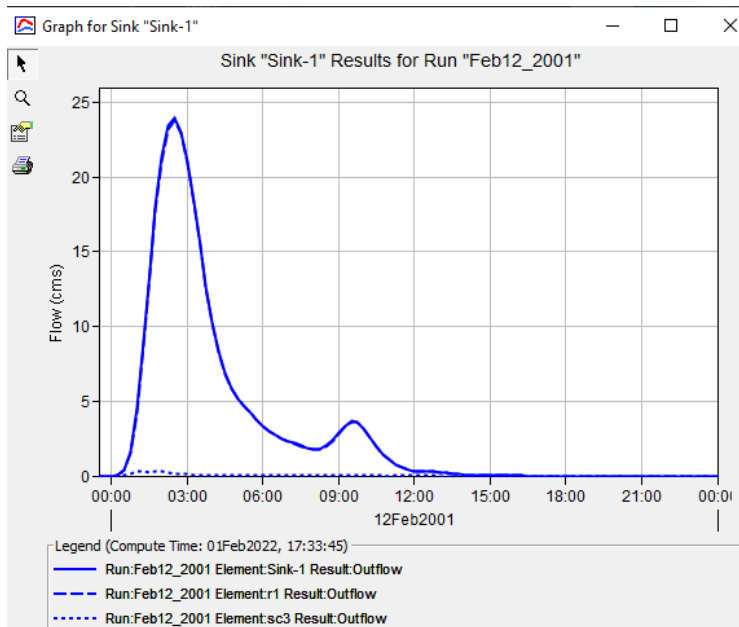


Figura 39 - Hidrograma a la salida de la cuenca.

cuenca 5 - Evento Feb12, 2001 (cuenca única)

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc1	10.7	113600	02:15
salida	10.7	113600	02:15

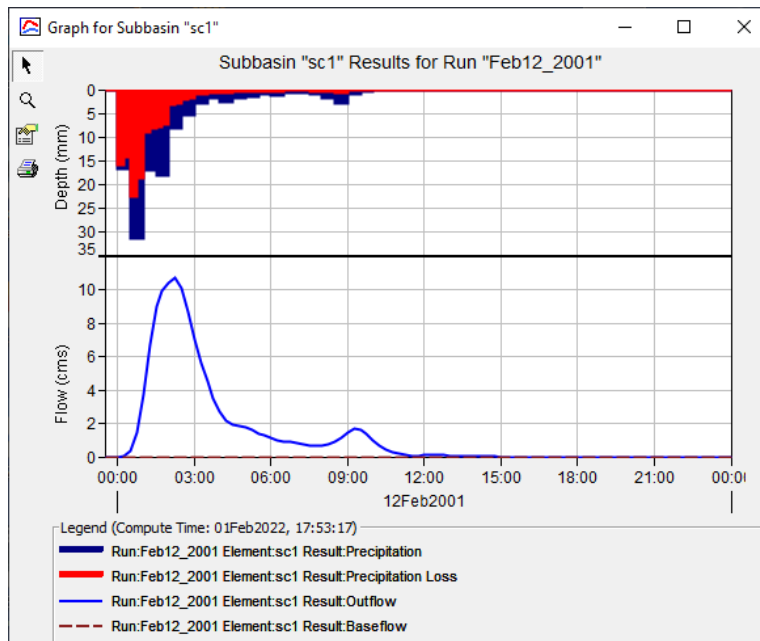


Figura 40 - Hidrograma a la salida de sc1. Vale para la salida.

cuenca 6

Corrida 1 - Evento Feb12, 2001

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc1	7.7	79800	02:00
sc2	4.0	41500	02:15
sc3	4.8	49800	02:00
salida	16.3	171000	02:15

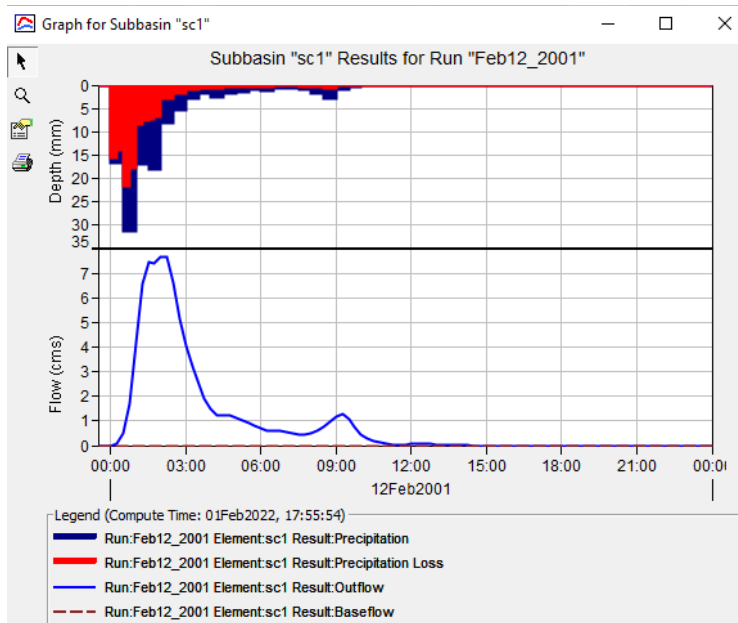


Figura 41 - Hidrograma a la salida de sc1.

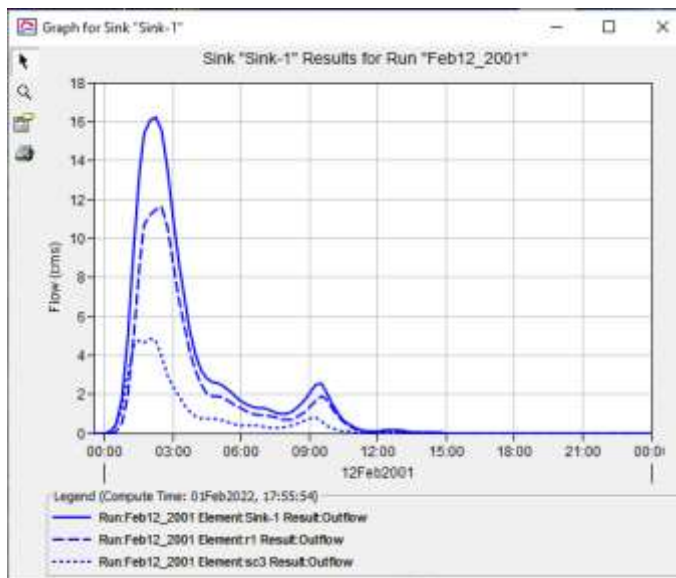


Figura 42 - Hidrograma a la salida de la cuenca.

Corrida 2 – Emplea frecuencia de lluvia para 20 años.

Inicio de lluvia 00:00 horas

Punto	Descarga pico (m3/seg)	Volumen (m3)	Tiempo pico
sc1	3.6	10300	01:05
sc2	1.8	5200	01:10
sc3	2.4	6500	01:05
salida	6.7	22000	01:25

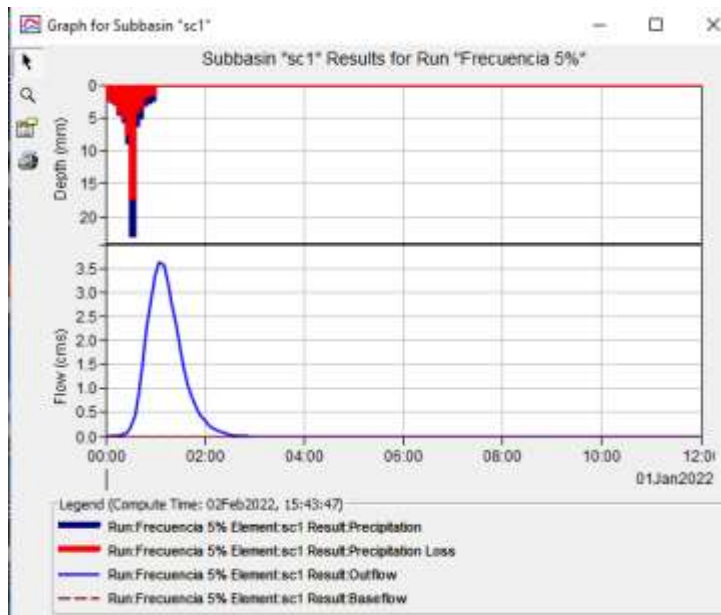


Figura 43 - Hidrograma a la salida de sc1.

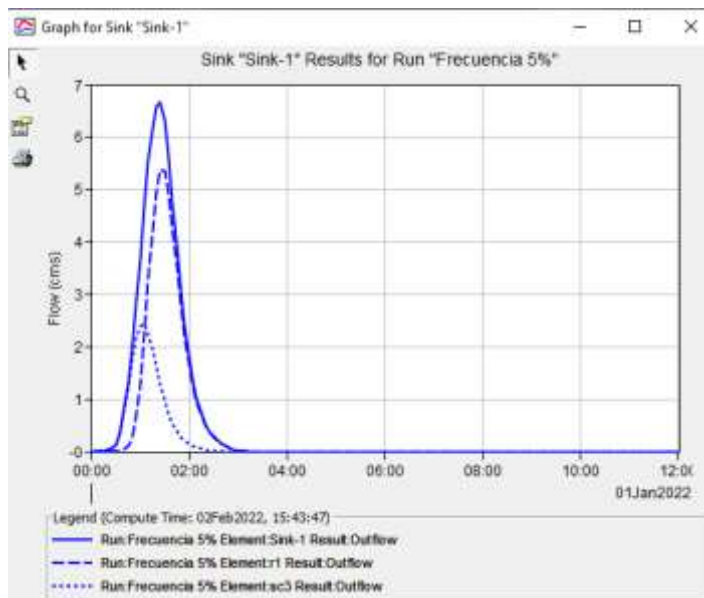


Figura 44 - Hidrograma a la salida de la cuenca.

Conexión faldeo-sistema de canales

Este capítulo explora la conexión hidráulica entre la cuenca 2 y el canal Cintura Norte. La cuenca 2 registró la mayor descarga, 40 m³/seg, y se toma como representativa de las demás cuencas relevadas. El canal Cintura Norte enlaza el cauce natural de salida de la cuenca 2 con el canal Nueva Esperanza, gran colector del escurrimiento septentrional (Figura 45). El propósito de la siguiente discusión es determinar si el canal Cintura Norte tiene la geometría necesaria para trasladar el caudal generado por la cuenca 2.

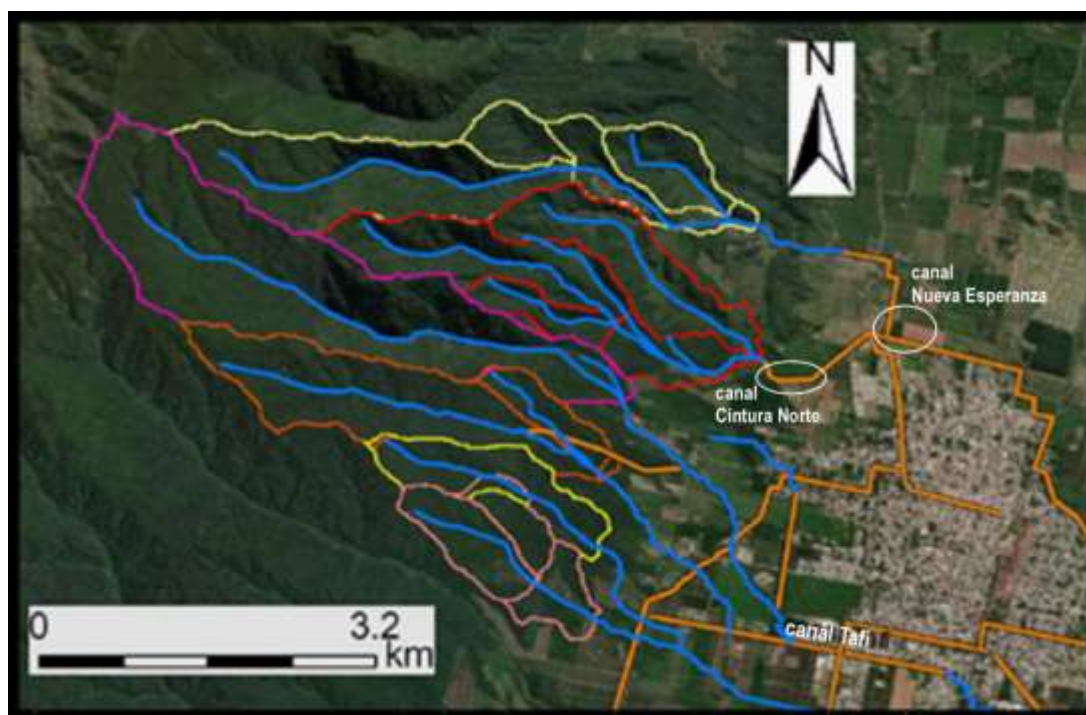


Figura 45 - Ubicación de las cuencas relevadas sobre una imagen de Google Earth. Se muestra la red de drenaje, incluyendo canales (en marrón), que desaguan los caudales serranos.

La Figura 46 muestra la traza en planta del canal Cintura Norte, tomada de planos gentilmente cedidos por la Dirección Provincial del Agua.

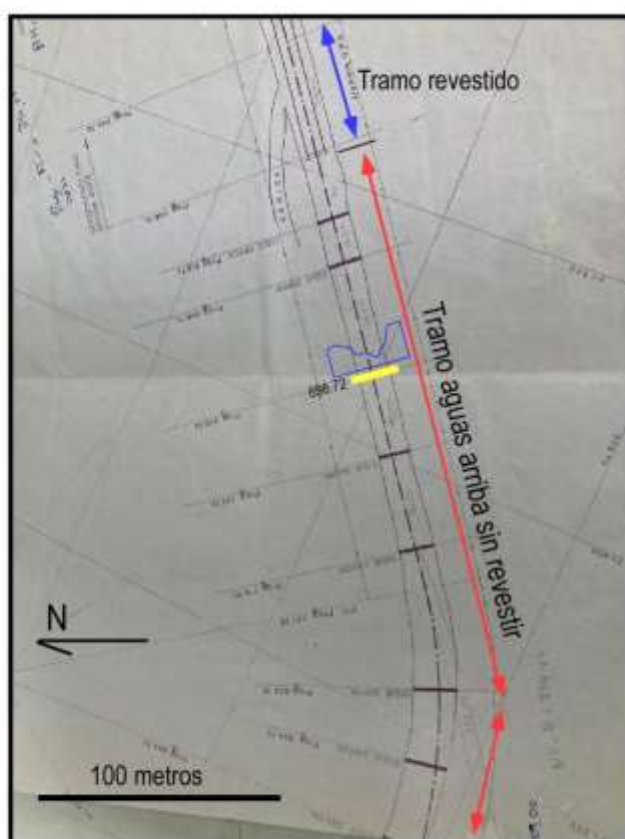


Figura 46 - Canal Cintura Norte. Los trazos gruesos en negro indican posiciones de 9 perfiles transversales. En azul se muestra un ejemplo de perfil transversal en la progresiva 698.72. La modelización empleó 9 perfiles transversales.

El largo total del canal Cintura Norte es de unos 320 metros. El tramo aguas arriba, de 266 metros de largo, ha quedado sin revestir. Este es el tramo que inicialmente recibe la descarga de la cuenca 2 y por este motivo se seleccionó para la modelización hidráulica con HEC-RAS. La Figura 47 muestra el perfil topográfico longitudinal. El desnivel total es de 11.66 metros. El gradiente promedio es de 0.044 m/m.

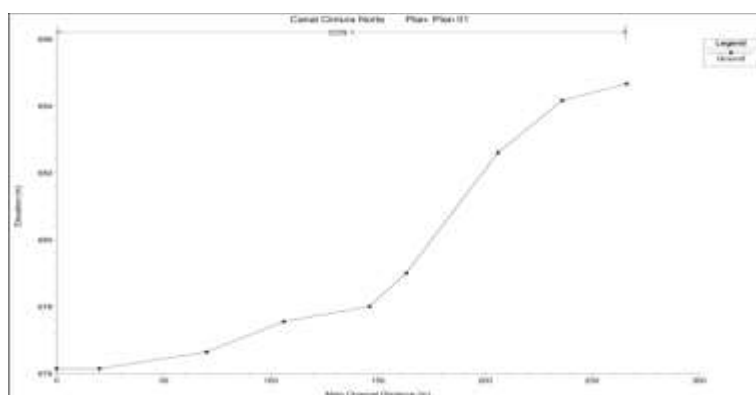


Figura 47 - Perfil longitudinal del canal Cintura Norte. Tramo sin revestir. Cada punto corresponde a una sección transversal.

La simulación empleó nueve secciones transversales tomadas de planos originales generados por la consultora Decio Costanzi. Una corrida inicial empleó una descarga de $40 \text{ m}^3/\text{seg}$, la descarga máxima estimada a la salida de la cuenca 2. La Figura 48 muestra el resultado de la simulación para la sección aguas arriba, 894. El caudal ocupa menos de la mitad de la profundidad del canal.

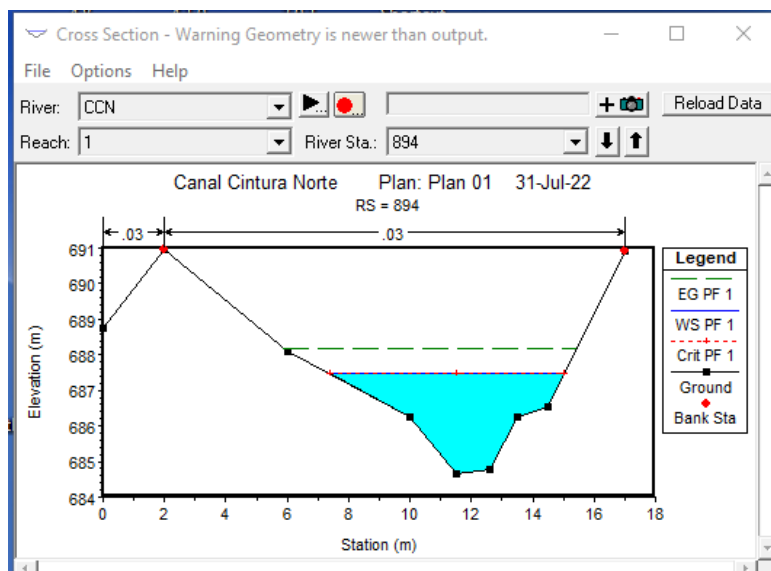


Figura 48 - Resultado de la simulación para la sección aguas arriba.

Las otras secciones dan resultados similares, como se aprecia en la perspectiva longitudinal (Figura 49).

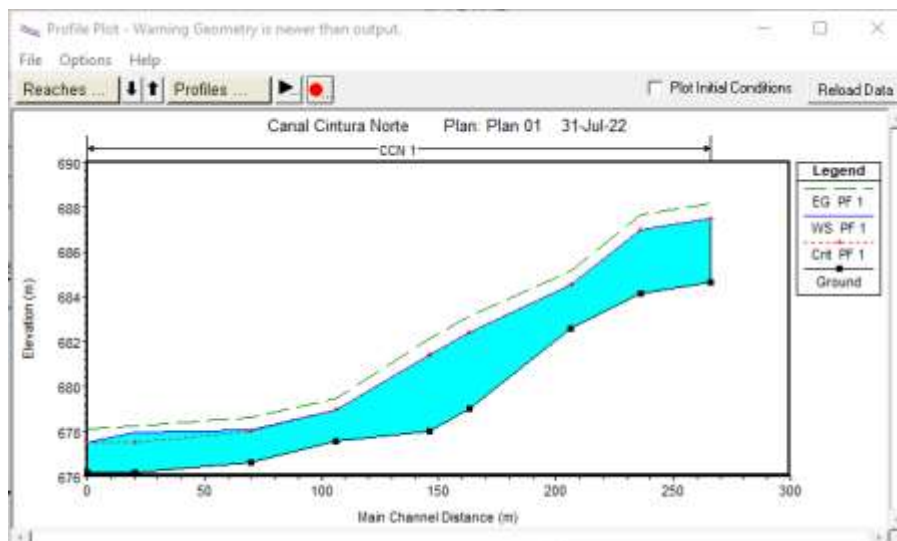


Figura 49 – Resultado de la simulación para descarga $40 \text{ m}^3/\text{seg}$ en vista longitudinal.

Tabla resumen de los resultados para la simulación a 40 m³/seg.

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: CCN Reach: 1 Profile: PF 1

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
1	894	PF 1	40.00	684.66	687.47	687.47	688.18	0.011422	3.73	10.74	7.66	1.00
1	864	PF 1	40.00	684.16	686.97	686.97	687.68	0.011415	3.73	10.74	7.66	1.00
1	834	PF 1	40.00	682.60	684.51	684.51	685.17	0.010233	3.61	11.08	8.49	1.01
1	791	PF 1	40.00	679.00	682.41	682.41	683.15	0.014189	3.83	10.45	7.15	1.01
1	774	PF 1	40.00	678.00	681.41	681.41	682.15	0.014171	3.83	10.45	7.15	1.01
1	734	PF 1	40.00	677.55	678.95	678.95	679.47	0.010184	3.21	12.47	12.08	1.01
1	698	PF 1	40.00	676.64	678.04	678.02	678.60	0.009182	3.30	12.11	10.38	0.98
1	648	PF 1	40.00	676.14	677.94	677.52	678.24	0.003823	2.45	16.32	11.10	0.65
1	628	PF 1	40.00	676.14	677.52	677.52	678.10	0.009764	3.37	11.86	10.34	1.01

Se consideró una posible subestimación de la descarga máxima calculada para la cuenca 2 subiendo la descarga simulada de 40 m³/seg a 100 m³/seg. La Figura 50 muestra el resultado para la sección aguas arriba, 894. El canal mantiene aun 2 metros libres.

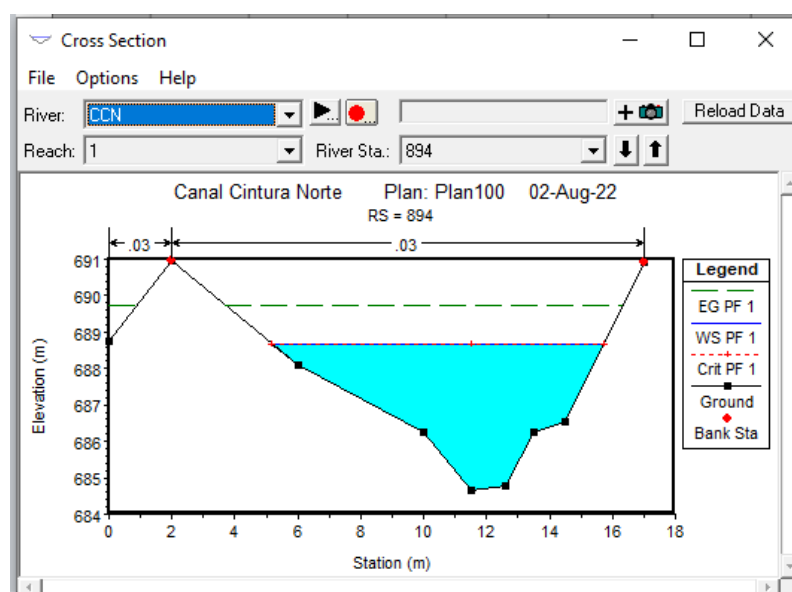


Figura 50 – Simulación de descarga para un caudal de 100 m³/seg.

Consideraciones finales

Dos propósitos centrales de este proyecto son: a) evaluar si es factible la instalación de un sistema de alerta temprana de inundación para la población de Tafí Viejo, y b) determinar la incidencia del escurrimiento proveniente del faldeo en la colmatación de los canales urbanos.

Tiempo de escurrimiento

El factor esencial a tener en cuenta para evaluar el beneficio de instalar un sistema de alerta temprana es el tiempo de escurrimiento, específicamente el tiempo que demora la onda de creciente en trasladarse desde el centro de masa de la lluvia hasta la zona urbanizada.

La geometría marcadamente elongada de las cuencas mayores, en particular las cuencas 1 y 3, se traduce en una protección natural contra el riesgo hídrico, debido a que aumenta el tiempo de concentración. La modelización hidrológica presentada arriba sugiere que entre el pico de lluvia y el pico de creciente a la salida transcurren entre 90 y 120 minutos. La experiencia recogida de otros sistemas de alerta temprana de inundación – donde se ha demostrado que un tiempo de concentración de 60 minutos puede ser suficiente para alertar a la población – indica que un sistema similar sería operativo para Tafí Viejo. Sería conveniente, sin embargo, instalar al menos un pluviógrafo a medio faldeo para ajustar mejor el tiempo de escurrimiento. En última instancia, la eficacia del sistema de alerta dependerá de una correcta calibración con las operaciones en el centro de control en cuanto a la recepción de la información y la emisión de instrucciones a la población.

Incidencia del escurrimiento serrano

La tabla resume los caudales aportados por cada cuenca.

Tabla resumen de aportes

cuenca	Descarga pico	Volumen
1	34	420000
2	40	447000
3	37	467000
4	24	280000
5	11	114000
6	16	171000

Las tres cuencas del norte son las principales contribuyentes de caudal y volumen al pie del faldeo. Aplicando el hietograma de Feb12, 2001, la conjunción de caudales de las cuencas 1 y 2 suma cerca de 870000 m³ de descarga en alrededor de 12 horas. Estas dos cuencas escurren al canal Nueva Esperanza. Suponiendo descargas simultáneas, el caudal combinado promedio es de unos 20 m³/seg. Este valor, aunque impreciso, sugiere que la descarga directa del faldeo serrano no causaría desbordes en los canales. Esta conclusión está circunstancialmente avalada por el registro de sitios de desbordes recurrentes de canal recopilados por el Plan Director (Hidrología), que se reproduce en la Figura 51. Los desbordes tienden a ocurrir en el interior del sistema de canales. En particular, notar que los desbordes del canal Nueva Esperanza ocurren en el tramo central. Esto permite inferir que los canales accesorios aguas arriba, como el canal Cintura Norte, y el canal que colecta aguas de la cuenca 1, tienen suficiente capacidad para trasladar el escurrimiento serrano, como indica la modelización.

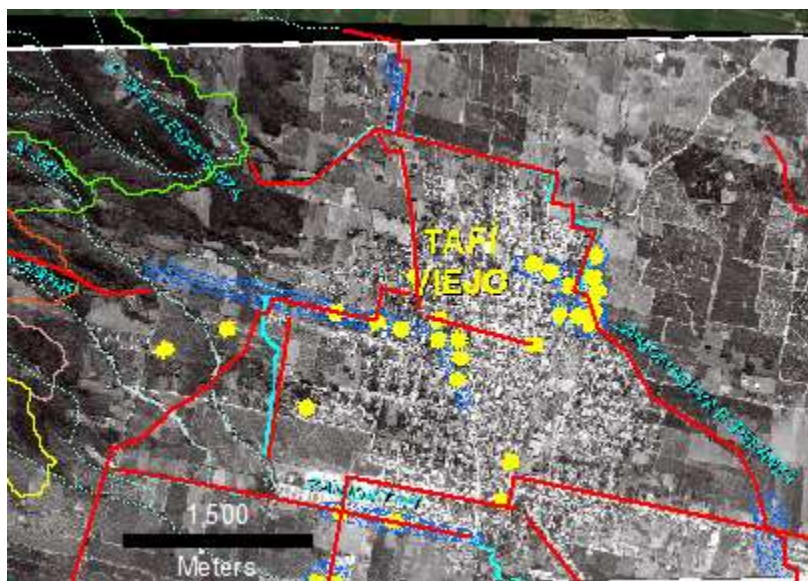


Figura 51 – Varios sitios con desbordes de canal recurrentes están indicados con puntos en amarillo.

Centro de Control y Alerta Temprana

Los tiempos de escurrimiento estimados hacen factible la instalación de un sistema de alerta temprana. En consecuencia, se sugiere que el Municipio de Tafí Viejo inicie tratativas con las áreas de defensa civil pertinentes con el propósito de adecuar la infraestructura necesaria y diseñar un protocolo de acción.

Conclusiones

Este DETEM se planteó dos objetivos relacionados: a) determinar si es factible instalar un sistema de alerta temprana para monitorear la descarga del faldeo, y b) determinar si es razonable atribuir los recurrentes desbordes en canales urbanos a la descarga serrana únicamente, o al menos principalmente.

Los tiempos de concentración en las cuencas que mayor caudal generan son suficientemente largos como para justificar la instalación de un sistema de alerta temprana. No obstante, se destaca la falta de pluviógrafos en el faldeo serrano. La instalación de un pluviógrafo a medio faldeo mejoraría la estimación del tiempo de concentración.

La modelización del escurrimiento serrano permite inferir que es insuficiente por sí solo para colmatar los canales urbanos. Se recomienda ejecutar un estudio hidrológico/hidráulico en el piedemonte, incluyendo las zonas urbanizadas de Tafí Viejo. Este estudio debería incluir un relevamiento hidráulico de toda la red de canales urbanos.

Agradecimientos

Deseo agradecer la colaboración del Ing. Martín Iturre, Dirección Provincial del Agua, por la provisión de información planialtimétrica del canal Cintura Norte, y del Ing. Agustín Sanzano, E.E.O.C., por información sobre suelos. Asimismo agradezco la colaboración del Ing Anibal Comba, Director de este DETEM, por la generosa provisión de información diversa, y de la Dra. María del Carmen Ahumada, UNE UNT, por el apoyo administrativo.

Bibliografía consultada

- Bazzano, F., 2019. Predicción de lluvias máximas para diseño hidrológico. Tesis Doctoral, UNT-FACET.
- Coon, W.F., 1998. Estimation of Roughness Coefficients for Natural Stream Channels with Vegetated Banks. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2441.
- Cruzate, G.A., G.N. Moscatelli, y J.I. Panigatti, 2005. Suelos y ambientes. Tucumán, Argentina. INTA
- Estudio hidrológico Tafí Viejo, Tucumán, 2017. UNT-FACET.
- Figuerola, L.R., C.M. Lamelas, y J.D. Forciniti, Frecuencia de ocurrencia de precipitaciones extremas diarias en El Colmenar, Tucumán. EEAO.
- Gourley JJ, Erlingis JM, Hong Y, y Wells EB, 2012. Evaluation of tools used for monitoring and forecasting flash floods in the United States. *Weather Forecast*, v. 27(1):158–173.
- Lazarte Sfer, R.R., y Hugo Roger Paz, Variabilidad de extremos de precipitación puntual por efectos orográficos en el Gran S. M. de Tucumán. UNT-FACET.
- Liu, Changjun, 2018. A review of advances in China's flash flood early-warning system. *Nat Hazards*, v. 92:619–634.
- Norte Grande Hídrica. Memoria descriptiva proyecto desagüe pluvial Boulevard 9 de Julio, ciudad de Yerba Buena – Dpto. Yerba Buena. BirfPIHNG.
- Paz, Hugo Roger, Lazarte Sfer, y Roberto R., Bazzano, Flavia, Análisis dinámico de tormentas extremas en el Gran San Miguel de Tucumán.
- Plan Director para la sistematización de las quebradas del flanco oriental de la sierra de San Javier y actualización del sistema de desagües. 2007. CIUNT – UNe – CEIHMA. Decreto del Poder Ejecutivo Provincial N° 3042/3 (S. O.) – Ley 7.185. En particular el capítulo Hidrología.
- Sanzano, A.J. y Fernández de Ullivarri, 2020. Suelos de Tucumán. Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán
- USACE, 2022. HEC-HMS Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center.

Gustavo González Bonorino
San Miguel de Tucumán, 5 de agosto, 2022.