

SISTEMA DE MONITOREO DE LA CUENCA DEL RÍO TACAGUA, OPTIMIZACIÓN DE LA RED Y HERRAMIENTAS PARA EL PRONÓSTICO HIDROLÓGICO

RAFAEL NAVAS

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Gerencia de Redes Hidrometeorológicas.
Coordinación de Hidrología Superficial
e-mail: rafaelnas23@gmail.com

Recibido: diciembre de 2010

Recibido en forma final revisado: octubre de 2011

RESUMEN

La tragedia de Vargas del año 1999, impulsó una serie de medidas de prevención; algunas de ellas basadas en instrumentación de sistemas de monitoreo de variables hidrometeorológicas. En este trabajo se discutió una metodología para la evaluación de la densidad de la red basada en los registros obtenidos de las estaciones ubicadas en la cuenca del río Tacagua. Se revisaron las falencias en la operación y el mantenimiento en los últimos años, así como también se recomendaron acciones para garantizar el funcionamiento futuro de la red.

Palabras clave: Sistemas de monitoreo, Densidad de redes, Inundaciones, Simulación de eventos, Pronóstico hidrológico, Río Tacagua.

MONITORING SYSTEM OF THE TACAGUA RIVER BASIN, NETWORK OPTIMIZATION AND TOOLS FOR HYDROLOGICAL FORECASTING

ABSTRACT

The tragedy of Vargas in 1999 prompted a series of preventive measurements, some of them based on instrumentation of monitoring systems of hydrometeorological process. In this paper, it is discussed a methodology for assessing the density of the network, based on records obtained from stations in the Tacagua river basin. The shortcomings in the operation and maintenance in recent years are reviewed and some actions are recommended to ensure the functioning of the network in the future.

Keywords: Monitoring systems, Network density, Flooding, Simulation event, Hydrologic forecasting, Tacagua river.

INTRODUCCIÓN

Los aludes torrenciales que se produjeron en el estado Vargas durante los años 1798, 1912, 1938, 1944, 1948, 1951, 1954 y 1999, dejan ver que el Litoral Central es una zona de alto riesgo sujeta a frecuentes inundaciones (López, 2005). Las pérdidas de vidas humanas hubieran podido evitarse en caso de que se hubiesen podido anticipar los eventos. Las avenidas de los años 1999 y 2005 impulsaron un conjunto de medidas de prevención entre las cuales está la implementación en el año 2007 del Sistema de Alerta Temprana en las cuencas de La Zorra, Tacagua y Mamo, contemplado dentro del programa Prevención de Desastres y Reconstrucción Social en el estado Vargas (PREDERES). Dicho sistema estuvo preliminarmente a cargo de la Universidad Central de Venezuela (UCV) y de

la Universidad Marítima del Caribe (UMC). Actualmente fue transferido al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), el cual lo está operado bajo el concepto de sistema de monitoreo.

Para alcanzar soluciones eficientes y sustentables a los problemas ligados a las inundaciones urbanas, resulta necesario actuar sobre las causas. Ello exige una comprensión más integrada del ambiente urbano y de las relaciones entre los sistemas que lo componen (Bertoni, 2005). En este trabajo se discute la densidad de la red de monitoreo para la comprensión de la distribución espacial de las precipitaciones en la cuenca del río Tacagua, esto como elemento sensible en la obtención de pronósticos hidrológicos aceptables.

CUENCA DEL RÍO TACAGUA

La cuenca del río Tacagua está ubicada en la Cordillera de la Costa al norte de Venezuela, nace cerca del sector La Matica a 1580 msnm, drena una superficie de 103,9 Km², desemboca en el mar Caribe en la población de Catia la Mar después de recorrer 21,6 Km de su cauce principal. Su ubicación relativa se observa en la Figura 1.

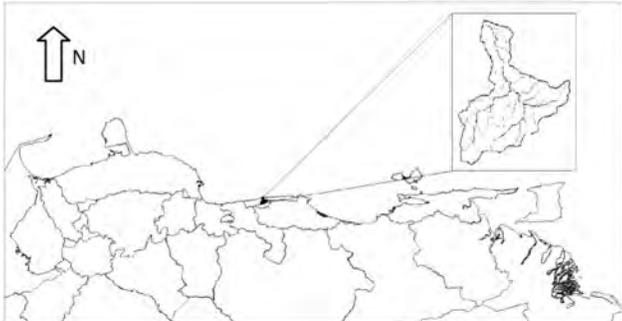


Figura 1. Ubicación relativa cuenca del río Tacagua

RED DE ESTACIONES

En el año 2007 se culminó la instalación de 18 estaciones en las cuencas vecinas la Zorra, Tacagua y Mamo. Se distinguen tres tipos de estaciones, las pluviométricas, que sólo registran lluvia por eventos a incrementos de 1 mm; las hidrométricas que monitorean el nivel del río generalmente cada 10 min y las climatológicas que tienen mayor número de parámetros, entre ellos se encuentran los sensores de velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa, radiación solar, humedad y temperatura del suelo.

En la Tabla 1 se presentan las coordenadas de las estaciones del sistema de alerta temprana, igualmente en la Figura 2 se esquematiza la ubicación de las estaciones en las cuencas monitoreadas.

Tabla 1. Estaciones de monitoreo en las cuencas de la Zorra, Tacagua y Mamo

Estación	Tipo	Latitud	Longitud
Alto Irapa	P	10° 28' 5"	67° 3' 18"
Alto Maderita	P	10° 33' 18"	67° 1' 24"
Alto Paraíso	C	10° 31' 10"	67° 37' 55"
Bajo Seco	C	10° 26' 10"	67° 12' 15"
Cantinas	C	10° 31' 38"	66° 57' 40"
El Banqueo	P	10° 31' 50"	67° 2' 52"
El Junko	C	10° 29' 9"	67° 3' 48"
Junquito Bomberos	P	10° 27' 43"	67° 4' 44"
Hermanidad Cristiana	P	10° 28' 30"	67° 9' 30"
Jeremba	P	10° 24' 43"	67° 13' 3"
La Zorra	PH	10° 35' 44"	67° 2' 7"
Luis Hurtado	P	10° 29' 1"	66° 59' 59"
Mamo	PH	10° 35' 29"	67° 3' 21"
Patio Recreacional	P	10° 27' 0"	67° 8' 32"
Petaquire	PH	10° 28' 9"	67° 9' 8"
Pozo Negro	P	10° 27' 37"	67° 6' 12"
Tacagua Desemboca	PH	10° 36' 16"	67° 1' 41"
Tacagua Viaducto 2	PH	10° 32' 50"	66° 59' 57"

P: Pluviométricas

C: Climatológicas

PH: Pluviométricas e hidrométricas

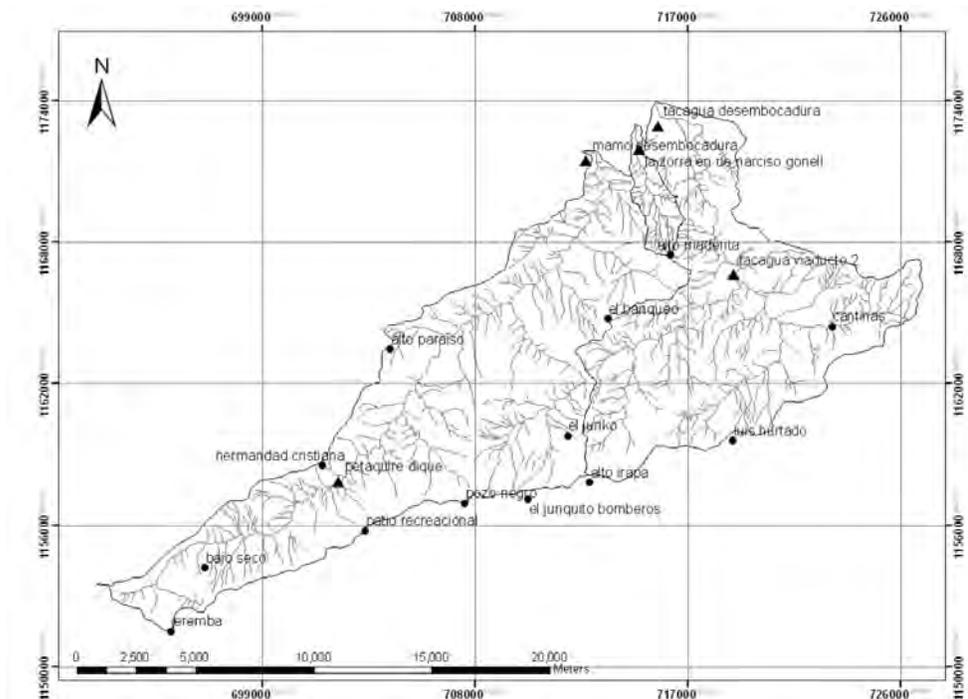


Figura 2. Red de estaciones en las cuencas de la Zorra, Tacagua y Mamo

SITUACIÓN ACTUAL

En el año 2008, el INAMEH inicia sus operaciones en el Parque Tecnológico de Sartenejas y se aboca a trabajar (como versa su lema) “**por la recuperación del servicio hidrometeorológico nacional**”. Entre las actividades que desempeña el instituto se pueden mencionar el monitoreo y registro de las variables hidrometeorológicas, a través de estaciones en superficie, en la alta atmósfera y de radares meteorológicos. Todo este complejo sistema demanda recursos económicos y humanos para garantizar su continuo funcionamiento. Considerando que los recursos que tiene la institución son reducidos y que el deseo de satisfacer las necesidades de información en todo el país es amplio, se evidencia que es necesario optimizar la red de la Zorra, Tacagua y Mamo para reducir costos de operación y mantenimiento.

El vandalismo de hoy en día es un problema que deben afrontar las instituciones que están operando y ampliando las redes de monitoreo hidrometeorológico y el INAMEH no se escapa de ello. Mucho antes de que la red de las cuencas La Zorra, Tacagua y Mamo fuera transferida al instituto, ya existían inconvenientes. Las estaciones de Alto Paraíso, El Junko y Cantinas fueron violentadas durante los días 15/09/2007, 14/02/2008 y 17/10/2008 respectivamente. El 10/09/2010 la estación Pozo Negro que además de ser Pluviométrica, sirve como repetidora permitiendo la comunicación de las estaciones Bajo Seco, Hermandad Cristiana, El Junquito Bomberos y Patio Recreacional, dejó de transmitir por esta misma causa.

Las estaciones hidrométricas se instalan por lo general para conocer y llevar el inventario de caudales medios, mínimos y máximos en una sección de un río. Los caudales máximos permiten diseñar por ejemplo obras hidráulicas como canales; por otra parte, los caudales medios y mínimos suelen ser usados en estudios de disponibilidad de agua y calidad ambiental. La red del estado Vargas fue diseñada con el fin de generar alertas para crecientes, por lo que se aceptó la propuesta de colocar los sensores apartados del cauce principal, con el fin de proteger a los elementos de tipo presión y reducir costos en la instalación de los sensores de ultrasonido. Esta decisión provoca que el hidrograma de alturas no se registre para niveles bajos y las estaciones no puedan ser utilizadas para llevar un registro continuo de niveles que produzca las series de caudales medios y mínimos. En la Figura 3 se observa la estación hidrométrica Tacagua en la desembocadura, la cual registra la variación de niveles sólo para alturas mayores a 1.90 m, debido a que cuando el nivel del río es bajo la zona de medición no tiene agua (el sensor apunta directamente al fondo del canal).



Figura 3. Estación Hidrométrica Tacagua en Desembocadura

Las torrenciales lluvias del pasado 24 de septiembre de 2010, provocaron que se desbordaran los ríos Marapa, Picure y Puerto Cruz ubicados en distintas localidades del estado Vargas (Ramírez, 2010). La Quebrada Tacagua estuvo en su máximo límite (Tovar, 2010). El gasto registrado de Tacagua en la desembocadura es el más alto hasta el momento (abril 2007 – septiembre 2010), con un estimado de 202 m³/s. En la Figura 4 se observa las marcas de la creciente del 24 de septiembre en el puente La Lucha en Catia la Mar, además de que se evidencia un punto crítico local producido por la reducción del área de la sección transversal por las fundaciones de la tubería. Los períodos de retorno para las crecientes de los principales ríos del estado Vargas han sido calculados por C.G.R Ingeniería (González, M. & Córdova, J.R., 2003). En la Figura 5 se aprecia que el gasto de 200 m³/s corresponde a un período de retorno de 8 años.



Figura 4. Marcas de creciente en el puente La Lucha

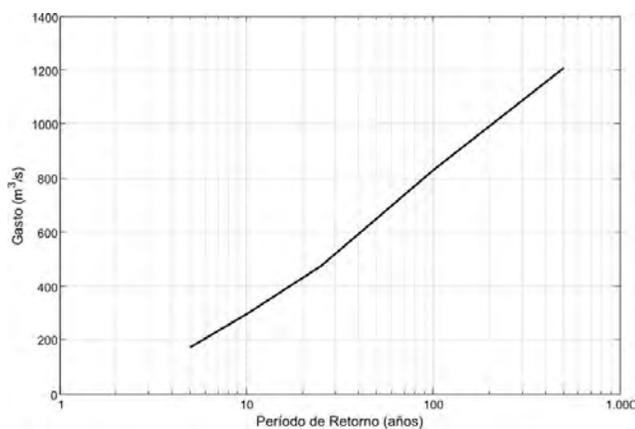


Figura 5. Período de retorno para caudales máximos del río Tacagua

METODOLOGÍA

La teoría de optimización se usa a menudo en el diseño y en las mejoras de las redes hidrometeorológicas. Es posible perfeccionar las redes por medio de programas numéricos basados tanto en el conocimiento como en la experiencia. Con frecuencia, la selección entre dos diseños de red, se debe hacer basándose en otros criterios, porque no existen las herramientas adecuadas de optimización o porque se requieren muchos recursos informáticos para que realmente sean eficaces (World Meteorological Organization, 2008). En este estudio se hace uso de un modelo hidrológico numérico físicamente fundamentado para la optimización de la red.

Para evaluar el efecto que produce una posible reducción en la red como alternativa para la disminución de costos de operación y mantenimiento, se implementó en la cuenca del río Tacagua el paquete computacional Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) (U. S. Army Corps of Engineers, 2008). Los datos recolectados durante las crecientes de los días 11 y 12 de agosto de 2007 en todas las estaciones, permitieron calibrar el modelo en la desembocadura. Se realizaron pronósticos retrospectivos en un escenario hipotético de disminución de la red evaluando todas las combinaciones posibles desde nueve hasta tres estaciones (sin considerar nuevas instalaciones), algunos de los escenarios se muestran en la Tabla 2. Se evaluaron los resultados de las simulaciones y se cuantificó el error que se comete debido a deficiencias en la densidad y distribución espacial de las estaciones.

MODELO HIDROLÓGICO

El HEC-HMS es un programa de simulación hidrológica de tipo semidistribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas a partir de condiciones de lluvias conocidas o pronosticadas, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa aceptados y usados en nuestro país.

Tabla 2. Estaciones consideradas por simulación

Simulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N° de estaciones	18	9	5	5	3	4	4	4	7
Alto Irapa	si	si	no	no	no	no	si	no	si
Alto Maderita	si	si	no	si	no	no	no	no	no
Alto Paraíso	si	no							
Bajo Seco	si	no							
Cantinas	si	si	si	si	si	si	si	si	no
El Banqueo	si	si	si	si	no	no	no	no	no
El Junko	si	si	no	no	no	si	no	no	no
El Junquito	si	no	no	no	no	no	no	si	no
Hermanidad	si	no							
Jeremba	si	no	si						
La Zorra	si	si	no	no	no	no	no	no	si
Luis Hurtado	si	si	si	no	no	no	no	no	si
Mamo	si	no	si						
Patio Recreacional	si	no							
Petaquire	si	no							
Pozo Negro	si	no							
Tacagua	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Boquerón	si	si	si	si	si	si	si	si	si

Se adaptó el modelo a la cuenca del río Tacagua donde se subdividió la cuenca en un total de 23 subcuencas. La morfología adoptada se muestra en la Figura 6.

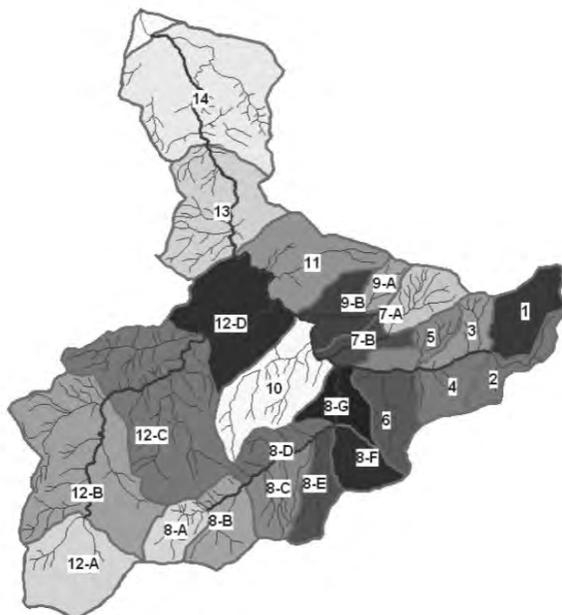


Figura 6. Morfología de subcuencas

Para definir las pérdidas se utilizó el modelo de pérdidas inicial y constante el cual se recomienda para cuencas que carecen de información detallada del suelo. Para tal fin se consideran solamente tres parámetros; el primero consiste en la pérdida inicial, que especifica la cantidad de precipitación que se infiltra o queda almacenada en depresiones antes de que la escorrentía superficial comience, éste es un parámetro que varía en las simulaciones si se consideran crecientes compuestas; el segundo radica en la tasa constante, que determina la velocidad de infiltración una vez iniciado el escurrimiento; y, finalmente, el porcentaje de área impermeable, establece la fracción de área que queda exenta a pérdidas y fue estimado sobre la base de imágenes satelitales.

Para la transformación de lluvia en escorrentía se utilizó el modelo del hidrograma unitario del servicio de conservación de suelos en Estados Unidos (HU SCS), el cual es un método empírico que trata de vincular la lluvia efectiva con la escorrentía. Se requiere sólo el tiempo de retraso y se define como la diferencia en tiempo entre el centro de masa de la lluvia efectiva y el pico del hidrograma. Los parámetros aceptados para el modelo de pérdidas y el de tránsito en laderas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de pérdidas y tránsito en laderas

Subcuenca	Área (Km ²)	Pérdida Inicial (mm)	Tasa Constante (mm/h)	% Impermeable	Tiempo de retardo (min)
1	3,05	22	35	2,5	0,168
2	1,84	22	35	25	0,214
3	1,80	22	35	2,5	0,100
4	2,16	22	35	25	0,100
5	1,95	22	35	2,5	0,124
6	3,08	22	35	25	0,147
7-A	2,50	22	35	2,5	0,114
7-B	1,56	22	35	25	0,168
8-A	2,01	22	35	2,5	0,140
8-B	3,00	22	35	7,5	0,160
8-C	2,77	22	35	7,5	0,190
8-D	1,96	22	35	2,5	0,136
8-E	2,19	22	35	5	0,170
8-F	2,14	22	35	10	0,136
8-G	2,10	22	35	10	0,210
9-A	1,07	22	35	2,5	0,100
9-B	2,49	22	35	2,5	0,138
10	5,74	22	35	2,5	0,265
11	5,27	22	35	2,5	0,168
12-A	5,48	22	35	7,5	0,130
12-B	11,46	22	35	2,5	0,209
12-C	12,45	22	35	2,5	0,292
12-D	6,41	22	35	2,5	0,183
13	7,07	22	35	2,5	0,241
14	11,61	22	35	25	0,374

Para la simulación cuando el flujo del canal se aleja de manera exponencial (recesión) se usó el método de recesión del flujo base. El modelo de recesión se utiliza a menudo para simular el drenaje de almacenamiento natural en una cuenca hidrográfica (Linsley, 1982). Los parámetros requeridos son tres: la descarga inicial, definida como el gasto producido por unidad de área en la cuenca; la constante de recesión, describe la tasa en la que decrece el flujo base entre eventos; y, finalmente, la relación al pico, que consiste en la relación entre el valor en el cual se puede empezar a calcular el gasto solamente usando la recesión y el valor del gasto máximo. Para todas las subcuencas se utilizaron los valores de $0,01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{Km}^2$ para la descarga inicial, con una constante de recesión de 0,1 y un radio al pico de 0,088.

Para el tránsito en los canales se utilizó el modelo de onda cinemática que especifica la distribución del flujo como una función de la distancia x a lo largo del canal y del tiempo t (Chow *et al.* 1994). Se consideraron 17 tramos de canales de los cuales 9 de ellos corresponden al cauce principal; se pueden ver sus parámetros en la Tabla 4.

RESULTADOS

Se calibraron los parámetros tasa constante, pérdida inicial, relación al pico y constante de recesión del modelo en la estación Tacagua en la desembocadura, en las tablas 5, 6, 7 y 8 se exhiben algunas calibraciones y en las figuras 7 y 8 se muestran la sensibilidad del gasto máximo y el volumen

simulado en función de la variación de los parámetros de calibración.

Se logró reproducir las crecientes disminuyendo la red hasta un mínimo de cinco estaciones y se identificaron Catinas, El Banqueo, Boquerón, Luis Hurtado y Tacagua en desembocadura como una primera aproximación de las estaciones indispensables para la validez del modelo lluvia escorrentía. En las figuras 9 y 10 se muestran los resultados de las simulaciones considerando la red completa con 18 estaciones y luego con cinco estaciones (simulaciones 1 y 3, respectivamente). En la Tabla 9 se muestra las diferencias en volumen y en el gasto máximo con respecto al observado para los escenarios propuestos.

Dadas las falencias actuales del sistema de monitoreo (como secuela del vandalismo), no es posible reproducir la creciente del 24 de septiembre de manera numérica para la validación del modelo en precipitaciones extremas. En la Tabla 9 se observan los errores al disminuir la red suponiendo el escenario de 7 estaciones del día 24 (simulación N° 9) para los días 11 y 12 de agosto de 2007. Se verifica que se subestima el caudal pronosticado, porque sólo estaban operativas las estaciones Tacagua en Viaducto 2, Tacagua en desembocadura, Mamo, Luis Hurtado, La Zorra, Jeremba y Alto Irapa. En las figuras 11 y 12 se muestran las simulaciones realizadas durante los días 11 y 12 de agosto de 2010 y para el 24 de septiembre de 2010.

Tabla 4. Parámetros de tránsito en canales

Canal	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Coef. Manning	Ancho	Pendiente del Talud (m/m)
P-1	4168	0,02030	0,025	3	1
P-2	1962	0,02141	0,025	5	1
P-3	3212	0,01743	0,025	5	1
P-4	1676	0,01670	0,025	8	1
P-5	2222	0,01889	0,025	8	1
P-6	1782	0,01571	0,025	8	1
P-7	1708	0,00819	0,025	10	1
P-8	10544	0,01859	0,025	10	1
P-9	8332	0,00840	0,020	10	1
T-1	3684	0,03799	0,025	3	1
T-2	2550	0,05487	0,025	3	1
T-3	6270	0,03796	0,025	3	1
T-4	3990	0,01754	0,025	5	1
T-5	8056	0,02954	0,025	3	1
T-6	7342	0,01144	0,025	3	1
T-7	5084	0,01652	0,025	5	1
T-8	3896	0,05390	0,025	3	1

Tabla 5. Calibración para la Tasa Constante

Calibración	1	2	3	4	5
Tasa Constante (mm/h)	8,8	61,3	17,5	52,5	35,0
Gasto Pico (m ³ /s)	218,5	38,7	150,7	39,5	83,9
Error en Gasto Máximo (%)	166,0	-48,3	85,2	-47,3	5,6
Volumen (mm)	24,4	8,2	18,8	8,8	12,0
Error en Volumen (%)	109,7	-25,1	63,5	-19,9	7,0
					Pérdida Inicial (mm): 22
Parámetros Fijos					Relación al Pico: 0,088
					Constante de Recesión: 0,100

Tabla 6. Calibración para la Pérdida Inicial

Calibración	1	2	3	4	5
Pérdida Inicial (mm)	5,50	38,50	11,00	33,00	22,0
Gasto Pico (m ³ /s)	194,7	82,1	134,3	81,9	83,9
Error en Gasto Máximo (%)	137,7	3,5	65,7	3,2	5,6
Volumen (mm)	29,5	9,8	23,6	9,8	12,0
Error en Volumen (%)	152,5	-11,7	103,1	-11,5	7,0
					Tasa Constante (mm/h): 35
Parámetros Fijos					Relación al Pico: 0,088
					Constante de Recesión: 0,100

Tabla 7. Calibración para la Relación al Pico

Calibración	1	2	3	4	5
Relación al Pico	0,022	0,154	0,044	0,132	0,088
Gasto Pico (m ³ /s)	80,5	83,3	81,4	84,3	83,9
Error en Gasto Máximo (%)	1,5	4,9	2,6	6,1	5,6
Volumen (mm)	7,2	17,2	8,8	15,4	12,0
Error en Volumen (%)	-32,8	50,5	-19,5	35,5	7,0
					Tasa Constante (mm/h): 35
Parámetros Fijos					Pérdida Inicial (mm): 22
					Constante de Recesión: 0,100

Tabla 8. Calibración para la Constante de Recesión

Calibración	1	2	3	4	5
Tasa Constante (mm/h)	8,8	61,3	17,5	52,5	35,0
Gasto Pico (m ³ /s)	218,5	38,7	150,7	39,5	83,9
Error en Gasto Máximo (%)	166,0	-48,3	85,2	-47,3	5,6
Volumen (mm)	24,4	8,2	18,8	8,8	12,0
Error en Volumen (%)	109,7	-25,1	63,5	-19,9	7,0
					Tasa Constante (mm/h): 35
Parámetros Fijos					Pérdida Inicial (mm): 22
					Relación al Pico: 0,088

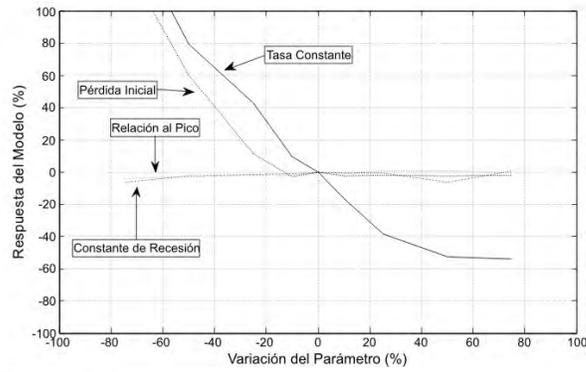


Figura 7. Sensibilidad del gasto pico simulado en función de la variación de los parámetros de calibración

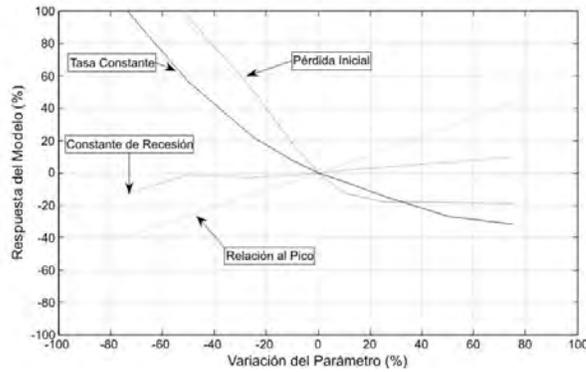


Figura 8. Sensibilidad del volumen simulado en función de la variación de los parámetros de calibración

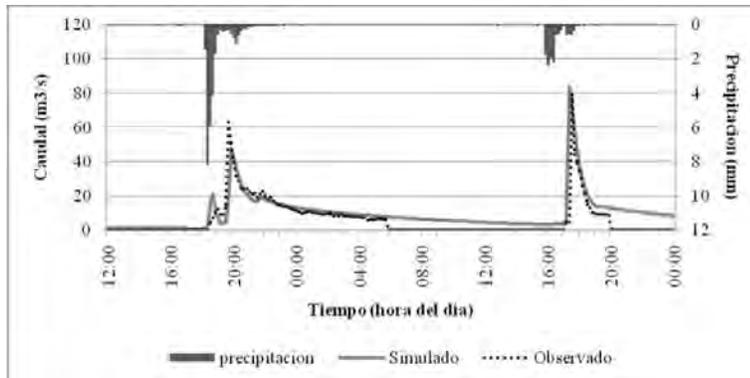


Figura 9. Simulación del 11-12 agosto, caso de simulación N° 1 (18 estaciones)

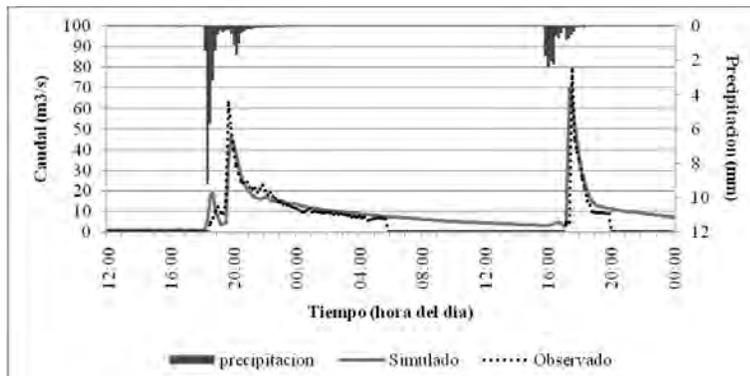
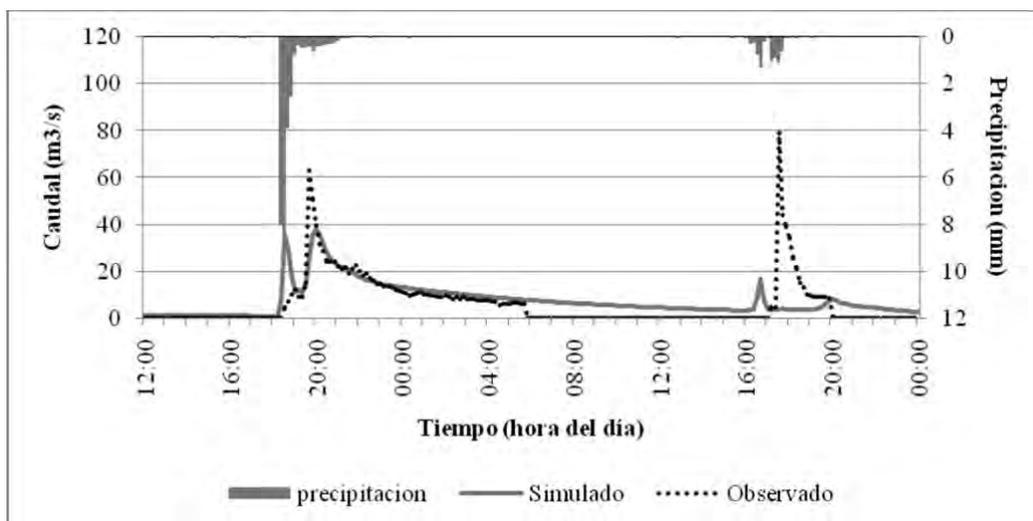


Figura 10. Simulación del 11-12 agosto, caso de simulación N° 3 (5 estaciones)

Tabla 9. Resultados de las simulaciones

	Observado	Simulado	Error (%)
Simulación N° 1			
Gasto Máximo (m ³ /s)	79,2	83,9	5,9
Volumen (mm)	11,2	12,0	7,5
Simulación N° 2			
Gasto Máximo (m ³ /s)	79,2	83,9	5,9
Volumen (mm)	11,2	12,0	7,5
Simulación N° 3			
Gasto Máximo (m ³ /s)	79,2	82,8	4,5
Volumen (mm)	11,2	13,0	16,0
Simulación N° 4			
Gasto Máximo (m ³ /s)	79,2	82,4	4,0
Volumen (mm)	11,2	13,8	23,1
Simulación N° 5			
Gasto Máximo (m ³ /s)	79,2	112,0	41,4
Volumen (mm)	11,2	22,1	97,4
Simulación N° 6			
Gasto Máximo (m ³ /s)	79,2	81,7	3,2
Volumen (mm)	11,2	14,0	25,3
Simulación N° 7			
Gasto Máximo (m ³ /s)	79,2	82,1	3,7
Volumen (mm)	11,2	15,4	37,4
Simulación N° 8			
Gasto Máximo (m ³ /s)	79,2	100,6	27,0
Volumen (mm)	11,2	22,0	96,9
Simulación N° 9			
Gasto Máximo (m ³ /s)	79,2	36,8	-53,5
Volumen (mm)	11,2	8,7	-22,5

**Figura 11.** Simulación del 11-12ago bajo las condiciones del 24 septiembre, caso de simulación N° 9 (7 estaciones)

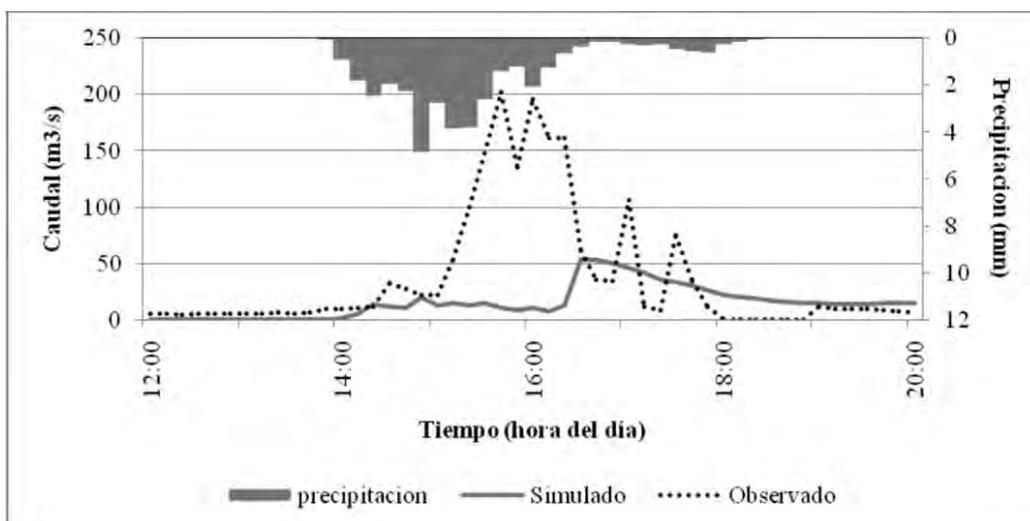


Figura 12. Simulación del 24 septiembre

DISCUSIÓN

Al evaluar los resultados de las simulaciones se evidencia que la densidad de la red y la distribución de las estaciones en una cuenca afectan el proceso de simulación. En la simulación número 3, se obtienen resultados aceptables al reducir la red hasta 5 estaciones obteniendo errores de 4,5 % en el gasto máximo.

La estación Cantinas está ubicada hacia la parte alta y cercana al centro de gravedad de la cuenca, a diferencia de las otras estaciones que se ubican sobre la divisoria (esta distribución se sustenta más en el criterio de facilitar el acceso de los técnicos en las jornadas de mantenimiento, que a garantizar que el dato recolectado sea representativo para la cuenca). Las simulaciones realizadas sin la estación Cantinas se alejan de los valores observados, por lo que se le identificó como indispensable para la validez del modelo. Los resultados obtenidos en la simulación N° 9 subestiman el caudal tanto para los días 11 y 12 de agosto como para el 24 de septiembre. Es bien sabido que la lluvia no tiene una distribución uniforme en el espacio y parece guardar cierta relación con el relieve. Todas las estaciones operativas para el 24 de septiembre están ubicadas al norte de la cuenca en la costa a excepción de la estación Luis Hurtado. Este factor es crítico en la falla del modelo el día 24, simplemente precipitó donde no existía ninguna estación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es posible optimizar la red originalmente concebida, disminuyendo el número de estaciones para la reducción de costos de operación y mantenimiento. Sin embargo, considerando la escasa disponibilidad de registros hidrometeorológicos a nivel nacional y más aún conociendo

que en escalas inferiores a 1000 Km² la disponibilidad de información hidrológica es reducida (Tucci, 2002), es recomendable conservar la densidad de la red de estaciones hidrometeorológicas de la Zorra, Tacagua y Mamo para que se conviertan en una red multipropósito que cumpla funciones tanto de alertas como de monitoreo y experimentales (investigación). Es importante mencionar que la función principal de alerta temprana con la que fue originalmente diseñada la red, aún no ha sido consolidada. Es necesario desarrollar la infraestructura que permita alertar a la población de forma oportuna, tal alerta puede implementarse por medio de sirenas ubicadas en los lugares críticos o mediante el envío de mensajes de texto automatizados a los interesados.

La situación topográfica, las vías de acceso y el vandalismo, por lo general, se oponen a los lugares ideales para el emplazamiento de estaciones. Es por esto que cuando la información en la cuenca es escasa se justifica sobrediseñar en una primera instancia las redes de monitoreo, después de un tiempo de operación prudente, es necesario evaluar la información recolectada y determinar si la red está bien diseñada para el fin con que fue pensada.

La estación Cantinas fue violentada en septiembre del 2007. Considerando que la fase preliminar de operación de la red no contemplaba ampliación de la misma, la estación no fue reubicada en un sitio equivalente. Como producto de este trabajo se observa que la estación es indispensable para la validez del pronóstico hidrológico en la cuenca del río Tacagua, es aconsejable la reinstalación de esta estación en un sitio equivalente que brinde seguridad, además, la nueva estación debe estar enlazada en el mismo sistema de gestión y comunicaciones que las demás estaciones de la cuenca.

REFERENCIAS

- BERTONI, J. C. (2005). *Programa de Capacitación para Gestores y Tomadores de Decisión Públicos en el Campo de los Recursos Hídricos*, Asociación Mundial del Agua. p. 90.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., MAYS, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill. NY. p 297.
- GONZÁLES, M. & CÓRDOVA, J. R. (2003). *Estimación de Hidrogramas de Crecidas en Cuencas del Litoral Central Luego de los Aludes Torrenciales de Diciembre de 1999*. Acta Científica Venezolana (AsoVAC, Caracas) 54 (1); pp. 63-87.
- KUNDZEWICZ, Z. W. (1986). *The hydrology of tomorrow*, Hydrological Sciences Journal. 31(2); pp. 223-235.
- LINSLEY, R. K. (1982). *Hydrology for Engineers*, McGraw-Hill Inc, New York.
- LÓPEZ, J. L. (2005). *Estrategias de Mitigación y Control de Inundaciones y Aludes Torrenciales en el Estado Vargas y en el Valle de Caracas: Situación Actual y Perspectivas Futuras*. Revista de la Facultad de Ingeniería (UCV, Caracas) 21 (4); pp. 61-73.
- RAMÍREZ, E. (2010). *Lluvias Causaron Desbordamiento de Tres Ríos en Vargas*. El Nacional. 25 septiembre. Descargado el 26 de septiembre desde: http://www.elnacional.com/www/site/p_contenido.php?q=nodo/157004.
- TOVAR, A. (2010). *Palo de Agua Afectó a Todo el País*. Últimas Noticias. 25 septiembre.
- TUCCI, C. E. M. (2002). *Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos*. Agencia Nacional de Aguas, 2002.
- U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. (2008). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Users's Manual v 3.2*. Hydrologic Engineering Center.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. (2008). *Guide To Hydrological Practices*. WMO No. 160.