

Evaluación del impacto hidrológico del rompimiento de la presa del embalse “El Isiro” en las zonas residenciales y agrícolas ubicadas en la planicie del río Coro

Hydrological impact assessment due to reservoir dam “El Isiro” outbreak in residential and agricultural areas located in the floodplain of the river Coro

Miguel Ángel Perozo Ynestroza¹ y Norberto V. Marrero De León²

RESUMEN. Los estudios hidrológicos de la cuenca del río Coro han desestimado los alivios y el colapso de la presa del embalse “El Isiro”, el cual se encuentra en dicha cuenca y sirve de fuente para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Coro en Venezuela. Aguas abajo de este embalse, se encuentra la planicie de inundación de dicho río, la cual está en proceso de urbanización. Además, en la actualidad se está desarrollando un proyecto agrícola para aprovechar las bondades que en este sentido tiene la planicie en cuestión. Por lo tanto, este trabajo se ocupó de incorporar la subcuenca que drena al embalse “El Isiro” y tomar en cuenta la posibilidad del rompimiento de la presa usando los software HEC-HMS y HEC-GeoHMS, los cuales permiten el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para optimizar la formulación del modelo conceptual de la cuenca. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede apreciar el alto impacto de considerar el rompimiento de la presa del embalse “El Isiro” en las zonas residenciales y agrícolas, en términos de caudales máximos y volúmenes escurridos. Este trabajo representa un aporte muy valioso para la gestión del riesgo de inundación en la zona en estudio.

Palabras clave: inundación, presa, rompimiento, HEC-HMS, HEC-GeoHMS.

ABSTRACT. Hydrologic studies in Coro river’s basin haven’t taken into account spillway’s overflow neither reservoir dam “El Isiro” collapse. This reservoir, located at Coro river’s basin, serves as a source for supplying drinking water to Coro city in Venezuela. Downstream of this dam is the river’s floodplain, which has been under an urbanization process. Also currently, there is a developing agricultural project to exploit plain’s advantages in that sense. Therefore, this work is held to incorporate the sub-basin that drains into the reservoir “El Isiro” and to take into account the possibility of dam breaking by using software HEC-HMS and HEC-GEOHMS, which allow the use of Geographic Information Systems (GIS) to optimize the formulation of the basin’s conceptual model. According to the results, a high impact in residential and agricultural areas (in terms of peak flows and runoff volumes) by considering reservoir dam “El Isiro” breaking can be appreciated. This paper represents a valuable contribution to flood risk management in the study area.

Keywords: Flood, dam, break, HEC-HMS, HEC-GeoHMS.

INTRODUCCIÓN

La gestión del riesgo de inundación en zonas urbanizadas y agrícolas debe contar con información suficiente y de calidad, tal que se pueda tener certeza científica de la magnitud, distribución espacial y temporal de dicho riesgo. Esto debe pasar necesariamente por la cuantificación de la amenaza y vulnerabilidad a la inundación; la primera permite conocer,

basados en análisis hidrológicos e hidráulicos, la probabilidad de que ocurra la inundación, y la segunda la propensión al daño de los elementos en riesgo. Este trabajo, aborda lo inicial del primer aspecto, lo cual se refiere al análisis hidrológico, cuyo caso de aplicación es la planicie de inundación del río Coro, la cual ha sido urbanizada de manera descontrolada durante los últimos 30 años y en la que además en la actualidad se desarrolla un proyecto agrícola en un área de 689 ha, en la margen derecha del río en plena planicie del mismo, Figura 1.

Recibido 20/06/10, aprobado 10/09/11, trabajo 53/11, investigación.

¹ M.Sc. Centro de Investigaciones en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Experimental “Francisco de Miranda”, Complejo Académico “Los Perozo”, Teléfono: 0268-2528882, Apartado Postal 4101, Coro, Estado Falcón, Venezuela, E-✉: mperozo40@gmail.com.

² Dr.C., Prof. Titular, Centro de Investigaciones Hidráulicas del Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba.

Hasta la actualidad en los análisis hidrológicos realizados en la cuenca del río Coro hasta su desembocadura, no se han tomado en cuenta los posibles alivios y menos el propio colapso de la presa del embalse “El Isiro”, la cual se encuentra en dicha cuenca y sirve de fuente para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Coro en Venezuela; además, se encuentra aguas arriba de los urbanismos y la zona agrícola proyectada en cuestión, lo que significa que cuando alivia aporta caudales adicionales a dicha planicie, y además considerar la posibilidad de su rompimiento aumenta considerablemente el riesgo de inundación. Por lo tanto, además de actualizarse el estudio hidrológico de toda la cuenca, se tomó en consideración el embalse “El Isiro” y la subcuenca que lo drena, así como la posibilidad de su rompimiento. Para ello, se usó como herramientas de apoyo los software HEC-HMS y HEC-GeoHMS, para modelar la relación lluvia escurrimiento a nivel de eventos para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años, considerando el rompimiento de la presa del embalse tanto por tubificación o sifonamiento como por vertimiento o rebase.



FIGURA 1. Zona de estudio. Fuente: Google Earth. Imagen de satélite del año 2006.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la ejecución de este trabajo se desarrollaron ocho (8) fases. En la fase 1 se recopiló la información básica para delimitar de forma automática la cuenca que drena al embalse “El Isiro”; para ello se usó información topográfica de la región en estudio a escala 1:25 000, a partir de esto se construyó el modelo de elevación digital (MED), apoyados en el uso del SIG ArcView GIS. Luego, utilizando la extensión HEC-GeoHMS, se delimitaron automáticamente la cuenca y subcuencas que drenan al río Coro hasta su planicie de inundación y se obtuvo el modelo conceptual de la cuenca, el cual fue exportado al software HEC-HMS. En la fase 2 se incorporó al modelo conceptual en el HEC-HMS el embalse “El Isiro”, para el cual se introdujo la curva altura-área-capacidad, que fue obtenida de una bati-

metría reciente así como de las características geométricas e hidráulicas de la presa y del aliviadero. De igual forma, se usó el módulo para considerar el rompimiento de la presa, llamado DAM-BREAK, y esto implica el planteamiento de diversos escenarios basados en el tipo de falla (tubificación o vertimiento) y la asunción de la geometría de la misma, así como el nivel de aguas donde se produce la falla, para ello se seleccionaron los métodos de activación y progresión de la falla. En la fase 3 se determinaron las precipitaciones máximas de diseño para 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años de período de retorno en cada una de las subcuencas delimitadas en la fase anterior; para ello, se ubicaron las estaciones pluviográficas influentes; para cada estación se construyó la curva Profundidad-Duración-Frecuencia (PDF) a partir de los respectivos análisis probabilísticos de los datos de cada estación; luego se determinó la precipitación de diseño; posteriormente, aplicando el método de los polígonos de Thiessen, se estimó la lluvia máxima promedio en cada subcuenca. Esta información se incorporó al modelo meteorológico del HEC-HMS. En la fase 5 se aplicó el método de la Curva Número (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos de Norteamérica (USA) para determinar la lluvia efectiva en cada subcuenca; para ello, se recopiló la información disponible de las características fisiográficas de la cuenca referidas a la cobertura vegetal, uso de la tierra y tipos de suelo; luego se obtuvo una CN para cada subcuenca. En la fase 6 se aplicó el método del Hidrograma Unitario del SCS de USA para transformar la lluvia efectiva en caudal en cada subcuenca. Con esto se obtiene el hidrograma a la salida de cada subcuenca y de la cuenca en su globalidad, y con ello la respuesta hidrológica de la misma. En la fase 7 se seleccionan los métodos para el tránsito en cauces (se utilizó el método de Muskingum) y en el embalse (método de la piscina nivelada). En fase 8 se analizan los resultados obtenidos en la fase anterior considerando los escenarios planteados en la fase 3, tomando en cuenta los caudales máximos, los tiempos en que ocurren los caudales máximos y los volúmenes de escurrimiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Obtención del MED de la zona de influencia de la cuenca que drena el río Coro

En la Figura 2, se muestra el MED obtenido de la sierra de San Luis del Estado Falcón, dentro de la cual se encuentra la cuenca del río Coro. Esto se obtuvo gracias a la integración de la información recogida de Perozo (2010), Linárez (2010), Arcila *et al.* (2003) y González *et al.* (2004).

Delimitación de la cuenca y subcuencas del río Coro

Con este MED obtenido y apoyados en la aplicación HEC-GeoHMS, se ubica el punto de cierre de la cuenca (planicie) en la desembocadura del río en el mar Caribe, obteniéndose la delimitación automática de la cuenca y subcuencas del río Coro hasta su planicie, Figura 3.

El resultado de la subdivisión de cuencas en subcuencas arrojó un total de 41 subcuencas que en conjunto abarcan un área de drenaje aproximadamente igual a 585,32 km². El

tiempo de concentración estimado para toda la cuenca fue de aproximadamente 14 horas.

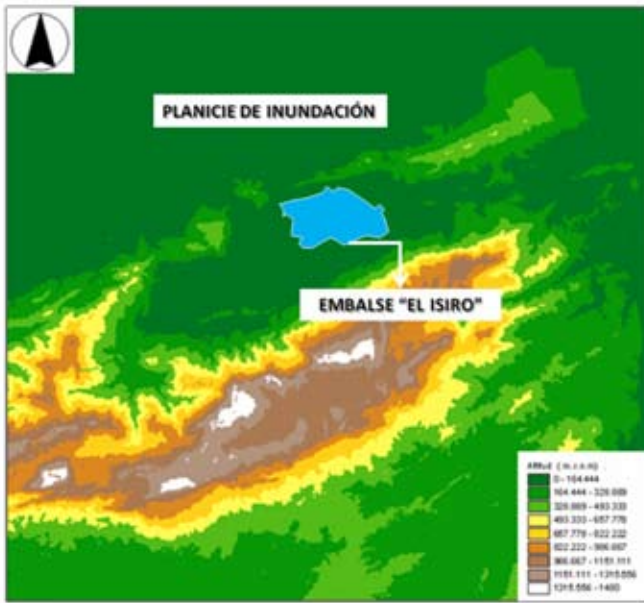


FIGURA 2. Modelo de elevación digital de la Sierra de Falcón.



FIGURA 3. Delimitación automática de la cuenca y subcuencas del río Coro hasta el punto de cierre.

Modelo Conceptual de la cuenca y subcuencas del río Coro

A continuación se presenta el modelo conceptual de la cuenca y subcuencas del río Coro hasta el punto de salida de su planicie de inundación incluyendo al embalse “El Isiro”, Figura 4.

Planteamiento de escenarios para considerar el impacto de tomar en cuenta los alivios del embalse “El Isiro” y el rompimiento de su presa.

Se seleccionaron los dos tipos de fallas (tubificación y vertimiento), su geometría, el nivel de activación, así como los métodos para modelar la activación y progresión de la misma. Se asume que la morfología de la falla es trapezoidal, la cual es

una de las formas más típica en estos casos, como se muestra en la Figura 5, donde B es el ancho superior de la brecha, b es el ancho de plantilla de la brecha, d es la profundidad de la brecha, y H es la altura del dique. Rivas y Berezowsky (2000), plantean que en general se conservan las relaciones $B/b \sim 1,3$, $B/d \sim 3$ y el talud $k \sim 3$. La relación B/b es inversamente proporcional a H. De acuerdo con estos criterios, se asumió que el valor del ancho de la brecha (B) es aproximadamente igual al 25% de la longitud total de la presa principal del embalse “El Isiro”, el cual tiene una longitud de 230 metros, por lo tanto, las dimensiones de la brecha asumida se muestran en la Figura 6. Esto es válido para los dos tipos de brecha asumidas.



FIGURA 4. Modelo conceptual de la cuenca y subcuencas en HEC-HMS considerando el embalse “El Isiro”.

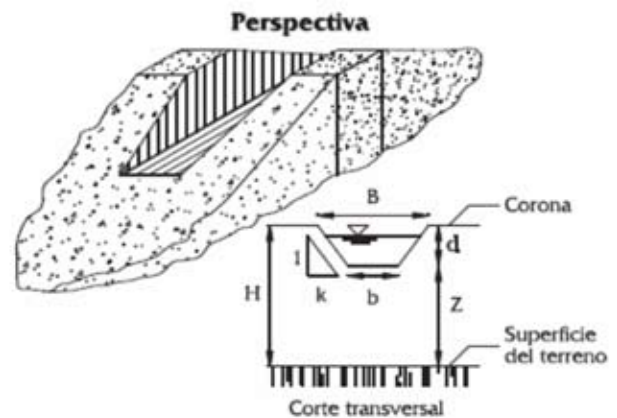


FIGURA 5. Forma y dimensiones de la brecha.

Para el tipo de falla por tubificación se escogió el método de activación llamado “Trigger Elevation”, el cual requiere la selección de un nivel de activación, que para el caso de estudio se escogió el nivel normal, el cual se considera como el más desfavorable. De igual forma para modelar la progresión de la falla se seleccionó el método lineal. Se plantean cuatro (4) escenarios para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca del río Coro: **escenario 1**: sin considerar los alivios del embalse; **escenario 2**: considerando los alivios del embalse; **escenario 3**: considerando falla por tubificación de la presa del embalse; y el **escenario 4**: considerando falla por vertimiento de la presa del embalse.

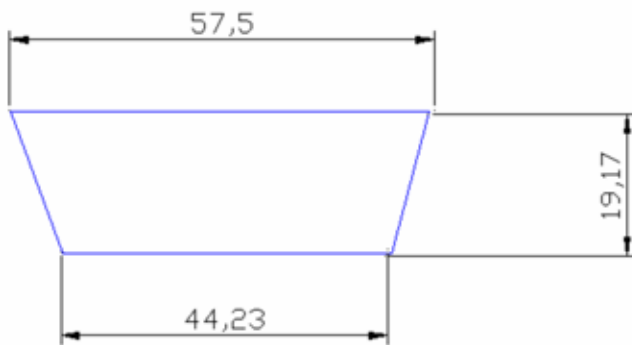


FIGURA 6. Dimensiones de la brecha (en m) asumida. Fuente: Rivas y Berezowsky (2000). En la presa del embalse “El Isiro”.

Determinación de la lluvia de diseño en cada subcuenca

Se efectuó un análisis probabilístico de los datos de lluvia máxima para diversas duraciones, apoyados en el software AJUSTE, el cual permite realizar una prueba de bondad del ajuste de dichos datos, considerando las distribuciones Normal, Log-Normal, Gumbel, Log-Gumbel, Pearson 3 y Log-Pearson 3; la prueba de ajuste usada fue la Smirnov-Kolmogorov. Los períodos de retorno seleccionados fueron: 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años. Las estaciones seleccionadas fueron en total siete (7): La Negrita – Isiro 2, Macuquita, Fundo Padilla, El Palmar, Las Polonias, El Mamón y Paso Florida.

Para la obtención de la lluvia de diseño se seleccionó su duración, la cual fue asumida como el tiempo de concentración de la cuenca cuya magnitud fue de 14 horas; mientras que para la frecuencia de diseño, se trabajó con los períodos de retorno mencionados.

Distribución espacial y temporal de la lluvia máxima

Aplicando el método de los polígonos de Thiessen, se determinó la influencia de cada una de las estaciones pluviográficas en las subcuencas obtenidas, Figura 7.



FIGURA 7. Distribución espacial de la lluvia máxima en la cuenca del río Coro.

Para la distribución temporal de la lluvia, se comprobó luego del análisis de más de 100 tormentas en los últimos 10 años, que la tendencia se aproxima bastante a la curva adimensional de tormenta tipo III que propone el SCS de USA, obteniéndose hietogramas de diseño para cada subcuenca. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de un hietograma obtenido.

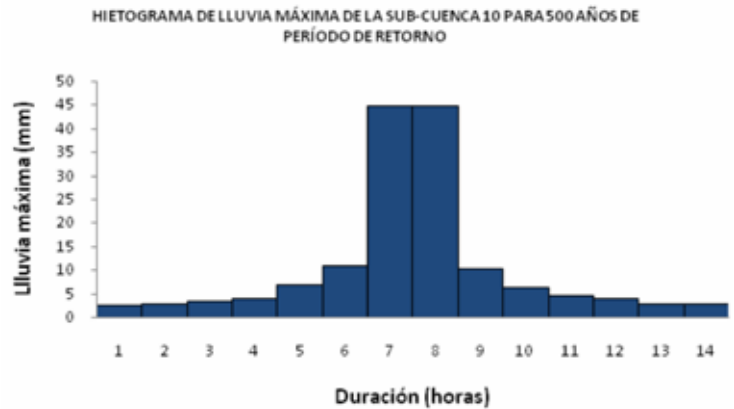


FIGURA 8. Hietograma de la subcuenca 10 para un período de retorno de 500 años.

Determinación de la respuesta hidrológica de la cuenca del río Coro en su planicie de inundación

Obtención de la lluvia efectiva

González *et al.* (2004) y Bastos *et al.* (2007) usando los datos obtenidos del análisis de las características fisiográficas de las subcuencas del río Seco y la que drena al embalse “El Isiro”, obtuvieron unos valores preliminares de CN de éstas. En este trabajo, se integraron y optimizaron estos datos y asumiendo como condición de humedad antecedente tipo III, la cual representa la condición más desfavorable, se obtuvo la CN definitiva para cada subcuenca; dichos valores variaron entre 67 y 80.

Obtención de los hidrogramas y volúmenes de escorrentía para los escenarios planteados

Aplicando el método del Hidrograma Unitario del SCS de USA en cada subcuenca, se obtuvieron los hidrogramas a la salida en cada una, sin considerar y considerando los alivios del embalse “El Isiro” y el rompimiento de su presa principal, traducidos en los cuatro (4) escenarios ya establecidos. Para el caso más desfavorable (500 años de período de retorno), el nivel del agua en el embalse no rebasa la presa, el nivel alcanzado sobre la cresta del aliviadero es de 66,8 m.s.n.m y la cota de la cresta de la presa es 70 m.s.n.m. Es importante hacer notar, que a pesar de que no se llega a rebasar la presa, el escenario de la falla por vertimiento es factible debido a deslizamientos que pueden producirse en la parte superior de esta en su paramento aguas arriba. En la Tabla 1 se muestran los caudales, los volúmenes máximos y los tiempos en que se presentan los caudales máximos, obtenidos producto de la modelación realizada para cada uno de los escenarios. De igual forma, en la Figuras 9 y 10 se presentan los hidrogramas a la salida de la cuenca para 500 años de período de retorno, para los escenarios 2 y 4.

TABLA 1. Caudales (m³/s), volúmenes máximos (millones de metros cúbicos (MMC)) y tiempos al pico (h), considerando los 4 escenarios en la cuenca del río Coro

| T (años) | Esc 1 | Esc 2 | Esc 3 | Esc 4 | Esc 1 | Esc 2 | Esc 3 | Esc 4 | Esc 1 | Esc 2 | Esc 3 | Esc 4 |
|----------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | Q | Q | Q | Q | Vol | Vol | Vol | Vol | Tp | Tp | Tp | Tp |
| 2 | 301,7 | 314,1 | 3692,4 | | 14,16 | 19,07 | 126,86 | 126,53 | 15 | 15 | 10,3 | 18,6 |
| 5 | 485,6 | 512,0 | 3723,9 | | 22,70 | 31,15 | 139,05 | 138,67 | 15 | 15 | 9,7 | 14,8 |
| 10 | 591,2 | 628,9 | 3741,3 | | 27,62 | 38,47 | 146,64 | 146,02 | 15 | 15 | 9,5 | 14,3 |
| 25 | 720,0 | 773,9 | 3741,6 | | 33,60 | 47,54 | 155,55 | 155,12 | 15 | 15 | 9,2 | 13,9 |
| 50 | 783,8 | 851,0 | 3741,1 | | 36,66 | 52,92 | 160,95 | 160,51 | 15 | 15 | 8,9 | 13,8 |
| 100 | 896,6 | 978,5 | 3757,3 | | 42,04 | 60,69 | 168,73 | 168,29 | 15 | 15 | 8,7 | 13,7 |
| 200 | 969,9 | 1068,7 | 3770,2 | | 45,25 | 66,47 | 174,55 | 174,10 | 15 | 15 | 8,5 | 13,5 |
| 500 | | 1229,8 | 3782,9 | | 51,81 | 75,98 | 184,08 | 183,64 | 15 | 15 | 8,3 | 13,4 |

Hidrograma obtenido en la salida de la cuenca del Río Coro para 500 años de período de retorno



FIGURA 9. Hidrograma en la salida de la cuenca del río Coro para 500 años de período de retorno sin considerar la falla de la presa del embalse “El Isiro”

Hidrograma obtenido en la salida de la cuenca del Río Coro considerando la falla por vertimiento para 500 años de período de retorno

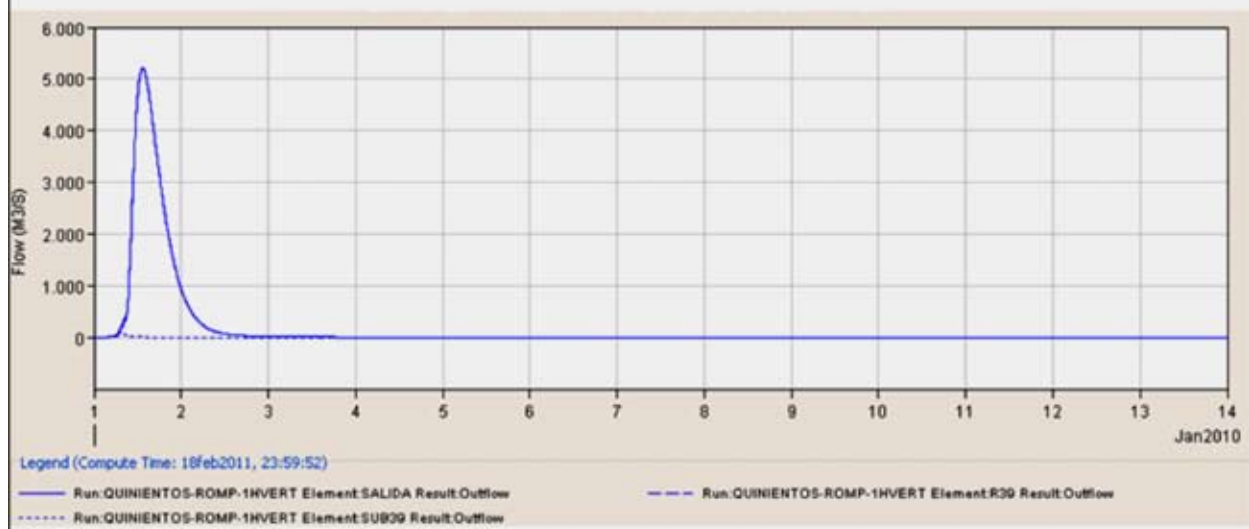


FIGURA 10. Hidrograma en la salida de la cuenca del río Coro para 500 años de período de retorno considerando la falla de la presa del embalse “El Isiro” por vertimiento.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que los caudales máximos obtenidos a la salida de la cuenca en estudio, se incrementan entre un 4 y 10% cuando se incorpora el embalse “El Isiro” y la subcuenca que lo drena, y en cuanto a los volúmenes de escurrimiento los mismos se incrementan para este caso entre un 26 y 32%. De igual forma, el impacto del rompimiento de la presa por tubificación incrementa los caudales máximos entre 3 y 12 veces más que los valores que se obtienen sin considerar esta falla, mientras que por vertimiento el incremento alcanza entre 5 y 13 veces. En lo que respecta al impacto de las fallas de la presa considerando los volúmenes totales escurridos, se tiene que en el rompimiento tanto por tubificación como por vertimiento, el incremento de los caudales máximos instantáneos varía entre 3 y 7 veces más que sin considerar el escenario de la falla. En cuanto a la variación de los tiempos en que se presentan los caudales máximos cuando se considera el rompimiento de la presa, se tiene que para el caso de la falla por tubificación estos tiempos se reducen entre un 32 y 45%, y en la falla por vertimiento se reducen entre un 2 y 11%, excepto para 2 años de periodo de retorno donde este tiempo aumenta un 24% con respecto al escenario donde no se considera la posibilidad de falla.

CONCLUSIONES

- Este trabajo permitió actualizar y complementar el estudio hidrológico de la cuenca del río Coro, e inclusive abordó aspectos relativos al colapso de la infraestructura hidráulica de envergadura en dicha cuenca, en este caso la presa “El Isiro”, cuyo embalse sirve como fuente de abastecimiento de la ciudad de Coro en Venezuela. Este último aspecto, representa una contribución de gran valía para el análisis del riesgo de inundación en los urbanismos y zona agrícola proyectada que están asentados en la planicie del río Coro aguas abajo del embalse, así como lo que el propio colapso representa para el servicio de agua potable a los pobladores de Coro. Es evidente que la incorporación del embalse “El Isiro” y la subcuenca que lo drena, coloca en evidencia la subestimación de la respuesta hidrológica de la cuenca del río Coro, cuando era omitido el embalse; en lo que se refiere a los caudales y volúmenes máximos. Además también se detectó que el tiempo en que se producen los caudales máximos se acorta de forma notable cuando se considera el colapso en cuestión, sobre todo en el caso de la falla por tubificación. Estos resultados nos permiten inferir que la consideración de la posibilidad de falla de la presa del embalse “El Isiro”, aumenta notablemente la amenaza y riesgo de inundación en la planicie del río Coro, donde están asentados más de 1000 edificaciones residenciales y 689 ha, dispuestas para la actividad agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCILA, G. y M. GUANIPA: *Base de Datos Geográfica de la Hoya de Curimagua como Herramienta Básica para la Planificación de los Recursos Hídricos en la Región Centro-Norte del Estado Falcón*, 135pp., Tesis de Diploma (en opción al título de Ingeniero Civil) Universidad Nacional Experimental “Francisco de Miranda”, Coro, Estado Falcón, Venezuela, 2004.
- BASTOS, Y. y L. GALICIA: *Evaluación hidráulica del aliviadero del embalse “El Isiro”, Estado Falcón*, 185pp., Tesis de Diploma (en opción al título de Ingeniero Civil), Universidad Nacional Experimental “Francisco de Miranda”, Coro, Estado Falcón, Venezuela, 2007.
- GONZALEZ, M y A. ORTEGA: *Estudio de Factibilidad Técnica para Implementar Medidas Estructurales de Control y Aprovechamiento de las Crecientes del Río Coro, en su Cuenca Media y Alta*, 240pp., Tesis de Diploma (en opción al título de Ingeniero Civil) Universidad Nacional Experimental “Francisco de Miranda”, Coro, Estado Falcón, Venezuela, 2004.
- LINÁREZ, I.: *Análisis de la Respuesta Hidrológica de la Cuenca del Río Coro apoyados en el uso de Sistemas de Información Geográfica*, 163pp., Tesis (en opción al título de Especialista en Recursos Hidráulicos), Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”, Barquisimeto, Venezuela, 2011.
- NANÍA, L. S.: *Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1.*, 76pp., Universidad de Granada, España, 2007.
- PEROZO, M.: *Sistema integral de medidas para la reducción del riesgo de inundación en llanura del río Coro*, 20pp., Anteproyecto de Tesis Doctoral, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2007.
- RIVAS, R. y M. BEREZOWSKY: “Brechas en Bordos de Arcilla Formadas por Desbordamiento”, *Revista Ingeniería del Agua*, 7(3): 255-262, Coyacán, DF, México, 2000.