



## METODOLOGÍA PARA LA PREVENCIÓN HIDROLÓGICA DE EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTRAORDINARIOS EN EL VALLE JIBACOA

Ing. Lumey Calvo Lino<sup>1</sup>  
[lumey@vc.hidro.cu](mailto:lumey@vc.hidro.cu)

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Lumey Calvo Lino (2017): "Metodología para la prevención hidrológica de eventos meteorológicos extraordinarios en el Valle Jibacoa", Revista Caribeña de Ciencias Sociales (abril 2017). En línea: <http://www.eumed.net/rev/caribe/2017/04/meteorologia-jibacoa.html>

### RESUMEN

Con este trabajo se busca facilitar el pronóstico de inundaciones en el Valle de Jibacoa, zona del macizo montañoso del Escambray, perteneciente al municipio Manicaragua, provincia Villa Clara. En el mismo se analizan y comparan los métodos aplicados en Cuba y en otras regiones del mundo y como resultado se propone una metodología operativa y sencilla partiendo de la lluvia caída sobre la cuenca que mediante gráficos combinados permite pronosticar el volumen y la cota topográfica que alcanzara el agua en el mencionado lugar, herramienta que en manos de los órganos de la Defensa Civil permite la toma de decisiones a la hora de evacuar personal o recursos de la economía a su debido tiempo, con lo que se mitigarán las afectaciones que puedan producir los eventos hidrometeorológicos extraordinarios.

**Palabras Clave:** hidrología- meteorology, prevención

### «METHODODOLOGY FOR HYDROLOGICAL PREVENTION OF EXTRAORDINARY METEOROLOGICAL EVENTS IN THE JIBACOA VALLEY»

### ABSTRACT

This work aims to facilitate the forecast of floods in the Jibacoa Valley, area of the mountain massif Escambray, belonging to the municipality Manicaragua, Villa Clara province. It analyzes and compares the methods applied in Cuba and in other regions of the world and as a result an operational methodology is proposed and simple starting from the rainfall on the basin that through combined graphs allows to predict the volume and the topographic dimension that it will reach The water in the mentioned place, a tool that in the hands of the Civil Defense organs allows the decision making in the evacuation of personnel or resources of the economy in due time, which will mitigate the damages that can produce the Extraordinary hydrometeorological events.

**Keywords:** hydrology-meteorological, prevention

---

<sup>1</sup> Ingeniera hidráulica desde 1997 que se desempeña en la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidraulicos de Villa Clara (IPH) que pertenece al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba (INRH)

## INTRODUCCIÓN

El área en estudio, comprende el Valle de Jibacoa perteneciente a la cuenca del río Agabama, está ubicada en la provincia Villa Clara, municipio Manicaragua.

El Valle de Jibacoa es una zona donde históricamente se producen inundaciones periódicas, de mayor o menor grado. Las inundaciones en el mismo se derivan de un problema antiguo; se tiene como referencia que a inicios del siglo XX se producían con mayor intensidad, por tal razón el sumidero siempre llamó la atención a coterráneos y visitantes, para asombro de todos, significa la desaparición de un río frente a la ladera de una montaña.

Esta red de drenaje, superficial y subterránea constituyen la parte alta de la cuenca del río Agabama; sin embargo, los drenes que evacuan las aguas carecen de capacidad necesaria de salida, se almacenan en el mencionado Valle, crean incertidumbre entre pobladores respecto a la evacuación con sus familiares y bienes personales más necesarios, por no disponer de alerta eficaz que determine esa situación.

El presente trabajo pretende acercar a la realidad la toma de decisiones en los pasos a seguir por autoridades de la Defensa Civil, que dictaminan, organizan y minimizan la incertidumbre en la comunidad ante eventos meteorológico de carácter extraordinario.

El pronóstico del escurrimiento máximo es uno de los problemas actuales de la vida práctica y la ciencia que estudia estos fenómenos con el objetivo de mitigarlos.

En Cuba las lluvias torrenciales se destacan por altos caudales máximos, grandes volúmenes y crecidas rápidas (en ascensos y descensos). Las inundaciones catastróficas que provocan considerables pérdidas a la economía están relacionadas con el paso de ciclones tropicales a través de la isla, con extensas zonas de nublados, precipitaciones altas y de intensidad o fenómenos meteorológicos locales.

Las inundaciones constituyen un fenómeno **inevitable**, por lo que es de gran importancia poder determinar el comportamiento de las precipitaciones en una cuenca dada y consecuencias como causa de avenidas fluviales.

Partiendo del criterio que la prevención es alerta a tiempo ante situaciones que pueden llegar a ser crítica, el pronóstico es eslabón importante para dar respuesta al fenómeno y la máxima mitigación.

Las inundaciones que producen los eventos meteorológicos extremos crean impacto temporal y local en el medio físico (entorno), biótico (flora y fauna) y socio – económico.

En los últimos años las pérdidas económicas por inundaciones en el Valle de Jibacoa ascienden a 5 000 000 pesos anuales en construcciones deterioradas, café y ganado, cuantiosos recursos que se destinan a evacuación de la población local y restitución de bienes (Yampier, Yarlén; 2006).

La zona presenta dos formas de relieve, valle intramontano y sistema montañoso, la primera compuesta por sedimentos cuaternarios, la segunda por rocas carbonatadas del grupo San Juan.

Desde el punto de vista evolutivo, se plantea la hipótesis que en un tiempo geológico determinado existió un río (actual Jibacoa) de cauce bien definido, movimientos tectónicos y procesos de metamorfismo regional de finales del período mesozoico y neógeno-cuaternario, produjo ruptura de fallas, deslizamiento y cizallamiento causante de la obstrucción del río Jibacoa.

A partir de ese momento es que comienza a formarse un represamiento y la formación de un lago cerrado muy profundo que durante largo tiempo inundó el valle, depósito de sedimentos aluviales y palustres que provocaron el aumento de concentración de CO<sub>2</sub> en el agua, el ambiente reductor aceleró la velocidad de disolución del carbonato existente que dio origen a conductos subterráneos a través de la montaña con salida a 105,0 metros de desnivel y su incorporación al cauce abandonado.

Las inundaciones en el Valle de Jibacoa se derivan de un problema antiguo, se tiene referencias que a inicios del siglo XX se producían con mayor intensidad, por tal razón el sumidero siempre llamó la atención a coterráneos y visitantes la desaparición del río frente a la ladera de una montaña. En aquella etapa la medida para evitar las inundaciones era conservar la limpieza del cauce; el paso de obstáculo al interior del sumidero, pudiera ser causa de incapacidad para evacuar aguas en períodos de lluvias prolongadas.

El problema principal de la evacuación en el valle consiste en la reducida capacidad de paso de la única vía natural de evacuación de las aguas que se acumulan al pie de la ladera, que inunda viviendas y objetivos económicos existentes en esa comunidad.

La evacuación fundamental de las aguas del río Jibacoa se efectúa por el conocido sumidero «Las trancas» de 2,00 km de largo y un área aproximada en la sección de entrada de 6,00 m<sup>2</sup>.

En resumen, el valle suele comportarse como un vaso impermeable y es por ello que las aguas tienen que buscar las formas cársticas al final de éste, como su vía de evacuación.

Las inundaciones por avenidas extraordinarias y catastróficas constituyen ocurrencias naturales causantes, de trastornos, riesgos y daños a múltiples actividades y la vida en la zona que afecta.

Los problemas que se asocian a consecuencias de eventos extremos hidrológicos, ejemplo: lluvias máximas, son complejos porque intervienen factores múltiples que se evidencian en las características fisiográficas y morfométricas de la cuenca.

Un aspecto de gran importancia, es el estudio del control de inundaciones las cuales suelen ser fenómenos estacionales, que se producen durante la estación de las lluvias.

Los argumentos que anteceden permitieron formular el **problema científico** en la necesidad de obtener pronósticos de volumen y cota topográfica que alcanzará el agua en el Valle Jibacoa para la toma de decisiones de los órganos de la Defensa Civil, dado que en la actualidad no se cuenta con una herramienta eficaz que determine las áreas de inundación en eventos meteorológicos extraordinarios.

En correspondencia con el problema científico que antecede, se consideró la **hipótesis** que el diseño de una metodología operativa con gráficos combinados que parten de la información de lluvia caída sobre la cuenca, para la determinación del pronóstico del volumen y cota topográfica del agua máxima que alcanzará las áreas de inundación en eventos meteorológicos extraordinarios en el Valle Jibacoa, permitirá contar con una herramienta de prevención hidrológica de utilidad para la toma de decisiones de los órganos de la Defensa Civil en el proceso de evacuación de personas, animales, recursos de la economía y mitigaciones de las afectaciones que pudieran producir eventos hidrometeorológicos extraordinarios.

En igual sentido se planteó como objetivo general proponer una metodología de prevención hidrológica de eventos meteorológicos extraordinarios en el Valle Jibacoa. El alcance de esa meta se desplegó en los siguientes objetivos específicos:

1. Fundamentar aspectos teóricos de prevención hidrológica para el análisis de procedimientos en Cuba y otros países.
2. Valorar datos de la ocurrencia de eventos extraordinarios precedentes en la cuenca del Valle de Jibacoa.
3. Diseñar una metodología de prevención hidrológica para la alerta temprana.

La investigación es **importante** para las soluciones técnicas ingenieriles en hidrología, seguimiento y detalles a eventos meteorológicos extraordinarios, mitigación de efectos medioambientales en la cuenca hidrográfica y zona de inundaciones que alcanza sus aguas máximas. También como información eficaz para la alerta temprana y en la toma de decisiones de los órganos de la Defensa Civil.

Es **necesaria** porque con las herramientas que se propone se pueden monitorear de manera sistemática los riesgos en las variaciones de caudales circulantes por la red hidrográfica de una cuenca, las inundaciones históricas y adoptarse las medidas medioambientales y defensa civil para evitar pérdidas de vidas humanas, animales y daños a la economía.

El estudio fue **viable** porque se dieron las condiciones necesarias para el desarrollo de la investigación desde la perspectiva del conocimiento y experiencia profesional en Ingeniería Hidráulica y otros estudios específico en hidrología, acceso a datos de la cuenca objeto de estudio e informaciones sobre la ocurrencia de eventos extremos pasados en la zona y contó con los recursos materiales necesarios.

La novedad de la investigación radica en que por primera vez se propone una metodología operativa y sencilla para pronosticar el volumen acumulado y la cota topográfica para la cuenca del Valle de Jibacoa.

Con la metodología se espera como resultado que se obtengan los gráficos combinados de utilidad para los pronósticos de inundación y que contribuyan al accionamiento de la Defensa Civil.

## DESARROLLO

La metodología que a continuación se expone, se propone para la elaboración de la prevención hidrológica en función de las relaciones que se plantean en el trabajo que se desarrolla posteriormente.

Pasos a seguir:

Introducción

Criterios de selección y recopilación de datos

Características fisiográficas

Disponibilidad de datos

Procesamiento y resultados de los datos disponibles.

Levantamiento topográfico de la zona.

- ❖ Confección de las curvas Área y Volumen en función de la cota topográfica del posible embalse de agua.
- ❖ Confección de las Curvas de Evacuación según caudal y tiempo en función de la cota topográfica.
- ❖ Construcción de las cuatro curvas para la prevención hidrológica en un gráfico
- ❖ Combinado (cota topográfica en función de la lámina de lluvia, volumen en función de la cota topográfica, volumen en función del tiempo de retardo y tiempo de retardo en función de la lámina de lluvia).
- ❖ Validación de las curvas de pronóstico.

Conclusiones y Recomendaciones

El área en estudio, comprende en primer lugar el Valle de Jibacoa perteneciente a la cuenca del río Agabama que está ubicado en la provincia Villa Clara municipio Manicaragua. El Valle de Jibacoa es una zona donde históricamente se producen inundaciones periódicas, de mayor o menor grado. Las inundaciones en el mismo se derivan de un problema antiguo; se tiene como referencia que a inicios del siglo XX se producían con mayor intensidad, por tal razón el sumidero siempre llamó la atención a coterráneos y visitantes, pues para asombro de todos, significa la desaparición de un río frente a la ladera de una montaña.

En aquel entonces, la medida para evitar las inundaciones era conservar la limpieza del cauce, aunque es posible que llegue algún obstáculo al interior del sumidero, fenómeno que al parecer ha provocado la incapacidad del mismo para evacuar las aguas durante las lluvias prolongadas. La situación mejoró, hasta cierto punto, con la construcción del embalse Hanabanilla - Jibacoa, el cual regula en un por ciento alto los escurrimientos de la parte superior de la cuenca Agabama (sólo quedan fuera los ríos Pretiles, Boquerones y Junco). El problema principal de la evacuación en el valle consiste en la reducida capacidad de paso de la única vía natural de evacuación, el sumidero que fue labrado por el río Jibacoa, teniendo 2,00 km de largo y un área aproximada en la sección de entrada de 6,00 m<sup>2</sup>.

Desde el punto de vista evolutivo, se plantea una hipótesis basada que en un tiempo geológico determinado existió un río (actual Jibacoa) que mantenía un cauce bien definido y debido a movimientos tectónicos relacionados con procesos de metamorfismo regional ocurridos a finales del período mesozoico y del neógeno-cuaternario, existió una ruptura de fallas, comportándose como deslizamiento y cizallamiento, causante de la obstrucción del río Jibacoa.

A partir de ese momento es que comienza a formarse un represamiento y con ello la formación de un lago cerrado muy profundo, que durante largo tiempo inundó el valle, depositando gran cantidad de sedimentos aluviales y palustres. Poco a poco sus aguas fueron aumentando la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el ambiente reductor aceleró la velocidad de disolución del carbonato existente,

dando lugar al desarrollo de conductos subterráneos a través de la montaña, logrando alcanzar su salida a los 105,0 m de desnivel, e incorporándose al cauce abandonado.

La zona, debido a su disposición y altura con respecto al nivel medio del mar, registra una alta pluviosidad, con un valor medio hiperanual superior a los 1500,00 mm. Según las investigaciones se pudo conocer de la ocurrencia de tres inundaciones en los últimos 60 años en el Valle de Jibacoa, antes de la realización de este trabajo:

1. Entre los días 6 y 7 de Agosto de 1944 cuando, según referencia de los habitantes más antiguos del lugar, las aguas alcanzaron niveles superiores a los 340,00 metros sobre el nivel medio del mar (msnmm), considerándose la de mayor envergadura. Es de destacar, que en esa época aún no existían las regulaciones del escurrimiento, debido a que no estaba construido el embalse Hanabanilla – Jibacoa
2. Entre los días 31 de Mayo y 1 y 2 de Junio de 1988, el país se vio afectado por la Depresión Tropical del Caribe, registrándose en la zona precipitaciones superiores a los 700,00 mm en 48 horas (uno de los más altos observados en el Caribe), las aguas alcanzaron la cota 336,89 msnmm, acumulándose en el Valle un volumen de 63,00 hm<sup>3</sup>,
3. Entre los días 17, 18 y 19 de Octubre de 1996, afectó al país el ciclón “Lily”, las precipitaciones registradas en la zona fueron superiores a los 685,00 mm y la cota por inundación alcanzada fue de 335,55 msnmm, acumulándose un volumen igual a 54,00 hm<sup>3</sup>

En los últimos años las pérdidas económicas provocadas por las inundaciones han ascendido a un total de 5 000 000 de pesos anuales, en construcciones deterioradas, en café y en ganado, además de los cuantiosos recursos que se destinan para la evacuación de la población local y la restitución de los bienes perdidos por estos desastres.

#### **Criterios de selección y recopilación de datos**

#### **Características fisiográficas y morfométricas**

El río Jibacoa es afluente del Ay que a su vez lo es del Agabama, cuya cuenca se localiza en las provincias Sancti Spiritus y Villa Clara.

La cuenca tiene características montañosas, observándose la presencia de fenómenos cárlicos, de los que son manifestaciones los sumideros.

La zona que abarca la cuenca del valle de Jibacoa sufre frecuentemente inundaciones que traen consigo pérdidas materiales, económicas y en ocasiones humanas.

Debido a que las avenidas superan la capacidad de evacuación del cauce y en consecuencia afecta su fisonomía, ecosistema agregado y las condiciones hidrológicas iniciales, inciden negativamente en el desarrollo de la flora y la fauna local, dañando la cadena alimenticia y empobreciendo la calidad del paisaje

Estos fenómenos, en el caso específico del Valle de Jibacoa, encuentran ubicados a diferentes alturas y a medida que sube el nivel del agua acumulada en el Valle va incrementándose la afectación. A partir de la cota 331,98 msnmm el agua toca la primera instalación y continúa afectando las mismas hasta la cota 336,97 msnmm, produciendo daños a los que ya se hizo referencia con las consabidas afectaciones económicas.

El río está regulado desde 1962, año en el que fue construido el embalse Hanabanilla - Jibacoa, cuya característica peculiar es almacenar el agua que proviene del río Jibacoa, conjuntamente con la de los ríos Hanabanilla, Negro y Guanayara, pertenecientes estos últimos a la cuenca del Arimao.

A continuación se dan las características principales de la cuenca Jibacoa aguas abajo de la presa Hanabanilla - Jibacoa hasta el túnel del sumidero.

Los datos que se muestran en la tabla 2 fueron determinados por cartas topográficas a escala 1:50 000. Y en el anexo gráfico 1 se presenta su ubicación.

Tabla 4 Características principales de la cuenca.

| Cierre                  | Ac<br>(km <sup>2</sup> ) | Lr<br>(km) | Yr<br>( <sup>TM</sup> ) | Yc<br>( <sup>TM</sup> ) | Lc<br>(m) | Hm<br>(m) |
|-------------------------|--------------------------|------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| Sumidero Río<br>Jibacoa | 84                       | 26,2       | 4,8                     | 270                     | 275       | 493       |

En la tabla:

Ac área de la cuenca colectora  
 Lr longitud del río  
 Yr pendiente del río (suavizada)  
 Yc pendiente de la cuenca  
 Lc longitud de la laderas  
 Hm altura media de la cuenca

### **Disponibilidad de datos**

- 1.- Datos de precipitaciones de los equipos pluviométricos de la región en estudio y zonas aledañas con sus características más comunes. Las características se muestran en la tabla 5 del anexo tabulado.
- 2.- Datos de registros de las estaciones hidrométricas ubicadas en alturas similares a la de la zona de estudio. Las características se muestran en las tablas 13 y 14.
- 3.- Datos del levantamiento topográfico efectuado para la valoración de las afectaciones provocadas por los fenómenos ocurridos en el Valle de Jibacoa. Se pueden ver en la tabla 12 del anexo tabulado.
- 4.- Estudios hidrológicos realizados en la zona, así como datos del expediente de la presa Hanabanilla, incluidos los correspondientes a la etapa de paso de los fenómenos meteorológicos que fundamentan este trabajo.

### **Procesamiento de la información recopilada para el análisis de riesgos hídricos**

#### **Aplicación de la Matriz de Importancia para la identificación y evaluación de peligros de origen natural y antrópico**

En los estudios realizados en la cuenca del Valle Jibacoa se destaca el deterioro de un conjunto de variables ambientales. Este deterioro se atribuye al manejo inadecuado de sus recursos naturales, derivado de las actividades económicas y sociales que se han desarrollado en el tiempo, con insuficiencias o ausencias de medidas de conservación y de gestión sostenibles. Con el propósito de identificar y evaluar el impacto de los principales peligros de origen natural y antrópicos en la cuenca del Valle Jibacoa, se emplea la Matriz de Importancia propuesta por Conesa (2000). Se consideran peligros hídricos a los factores impactados por el agua.

Se identificaron los siguientes factores impactados: el suelo, la diversidad biológica, paisaje y el hombre. Este último factor incluye impactos de tipo social, cultural y económico. Los factores impactantes (peligros hídricos) identificados fueron: inundaciones por intensas lluvias:

(A1) Láminas de lluvia hasta 150 mm.

(A2) Láminas de lluvia mayores a los 150 mm.

Como resultado de las consultas realizadas a un grupo de expertos integrantes del Grupo Técnico del Consejo Territorial de Cuencas de Villa Clara, se llegó a un consenso sobre la valoración cualitativa de las acciones impactantes y de los factores ambientales impactados mediante una valoración ponderada de la importancia relativa de los factores y la importancia de los impactos sobre este factor.

$$\bullet \quad I = \pm (3I + 2Ex + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC)$$

A los impactos se les asignó el carácter positivo o negativo, en función de la incidencia, con valores de importancia entre 13 y 100. Los impactos relacionados con cada peligro con valores de importancia menores que 25 son irrelevantes. Los impactos moderados presentan una importancia entre 25 y 50. Serán severos cuando se encuentre entre 50 y 75 y críticos cuando el valor sea superior a 75.

En la Matriz de Importancia se obtiene una valoración cualitativa del efecto de cada acción impactante (peligro hídrico) sobre cada factor ambiental impactado. Los resultados de la Matriz de Importancia elaborada se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Matriz de Importancia parte baja Cuenca Sagua la Grande.

| UI            | Acciones     | A2    | A3    | Imp. Absoluta | Imp. Relativa |
|---------------|--------------|-------|-------|---------------|---------------|
|               | Factores     |       |       |               |               |
| 200           | F2 - Suelo   | -26   | -79   | -105          | -21           |
| 300           | F5 - Biota   | -21   | -41   | -62           | -18,6         |
| 100           | F6 - Paisaje | -27   | -58   | -85           | -8,5          |
| 400           | F7 - Hombre  | -21   | -62   | -83           | -33,2         |
| Imp. Absoluta |              | -95   | -240  | -             | 81,3          |
| Imp. Relativa |              | -22,6 | -58,7 | -             |               |

|  |  |
|--|--|
|  | efecto irrelevante (valores menores de 25) |
|  | efecto moderado (valores entre 25 y 50)    |
|  | efecto severo (valores entre 50 y 75)      |
|  | efecto Crítico (valores mayores de 75)     |

Como se puede apreciar aunque siempre las consecuencia de las inundaciones es negativa en el caso de ocurrencia de láminas de lluvias menores de 150 mm el efecto de las lluvias irrelevante en cuanto a su efecto sobre la biota, el hombre y tiene un efecto moderado en cuanto al suelo y el paisaje, esto es debido que con láminas menores a 150 mm el sumidero evacua los caudales provocados por esas lluvias sin grandes consecuencias. Cuando las láminas aumentan la capacidad de evacuación del sumidero disminuye y se empieza a acumular el agua en el valle lo que provoca impactos moderados a la biota, severos al hombre, paisaje y crítico en el suelo. Por su alta importancia es que se decide dirigir este trabajo al análisis de riesgos de inundaciones debido a los peligros hídricos de intensas lluvias.

#### Análisis de riesgos naturales relacionados con el peligro de inundaciones por intensas lluvias

El peligro de inundación por intensas lluvias en el área de estudio es considerado como alto atendiendo al aumento y frecuencia de la ocurrencia de los eventos naturales, además de la incidencia del hombre al invadir las áreas vulnerables a inundación; colocando estructuras y realizando actividades que requieren protección.

La causa principal que propicia la ocurrencia de las inundaciones son las lluvias y en nuestro caso tienden a incrementarse en función de diversos factores meteorológicos como son los huracanes en la zona caribeña, asociadas a fuertes vientos y lluvias intensas motivadas por la misma depresión tropical.

#### Resultados del procesamiento de los datos

En la zona de estudio hay instalada una amplia red pluviométrica, cuyos equipos están ubicados a diferentes alturas y ocupan distintas posiciones dentro de la misma. Estos equipos cuentan con un período de observaciones que fluctúa entre 30 y 38 años. El período de cálculo seleccionado fue de 37 años desde 1964 al 2001, utilizándose las técnicas de computación según lo establecido en la Norma Cubana 48-35 de 1984 "Determinación de la lluvia máxima diaria", analizándose:

- Lugar de ubicación en la zona.
- Altura del equipo y altura media del lugar en estudio.
- Depuración primaria de las series. Calidad y longitud de las mismas.
- Homogeneidad y aleatoriedad de las series de observaciones.
- Valores obtenidos en las correlaciones lineales y múltiples

En estos procesamientos se trabajó con el programa “Gastos” en su bloque de depuración de las series. Como resultado se seleccionaron dos equipos representativos (316 y 922), cuyas series son aleatorias, homogéneas y presentan correlaciones con el resto de los equipos que varían entre 0,80 y 0,95 por lo que se consideran buenas. Además la ubicación de ambos equipos responde a las características físicas y geográficas medias de la zona, así como a las altimétricas.

Del procesamiento estadístico de las series se seleccionaron los valores extremos registrados durante 24 y 48 horas en los equipos utilizados como representativos para el área de estudio, durante la ocurrencia de los fenómenos extraordinarios analizados en el trabajo. Se procesaron las series de datos de las estaciones hidrométricas ubicadas en zonas altas, como son las del río Caracusey (afluente del Agabama) en el lugar conocido por “Gavilanes” y la cercana al poblado “Caracusey” en el propio río, así como la existente en las cercanías del poblado de “Sopimpa” en el río Agabama.

Se analizaron los datos que se poseían:

Gavilanes: 1964-1981 correlación con Paso Ventura  $R_{xy} = 0.87$  (16 años) ,

1982-2001 (20 años) serie real, correlación con las precipitaciones de la cuenca  $R_{xy} = 0.86$

Caracusey: 1964-1981 correlación con Paso Ventura  $R_{xy} = 0.82$  (16 años) ,

1982-2001 (20 años) serie real.

Sopimpa: 1964-1969 correlación con Paso Ventura  $R_{xy} = 0.87$  (6 años) ,

1970-2001 (32 años) serie real.

Determinándose el período de cálculo a utilizar, de 31 años (1970-2001).

**Tabla 6 Características de las estaciones hidrométricas**

| Estación  | Coordenadas |       | Ac<br>km <sup>2</sup> | Hm<br>m | Inicio de<br>las observ. | Lámina de<br>escurrimiento<br>anual<br>(mm) | Cv   | Error<br>medio<br>cuadrá<br>tico |
|-----------|-------------|-------|-----------------------|---------|--------------------------|---|------|----------------------------------|
|           | N           | E     |                       |         |                          |   |      |                                  |
| Sopimpa   | 242,5       | 623,6 | 852,0                 | 181     | 1970                     | 372   | 0,37 | 12,2                             |
| Caracusey | 226,6       | 625,0 | 118,7                 | 330     | 1982                     | 520   | 0,45 | 12,6                             |
| Gavilanes | 235,5       | 639,4 | 26,6                  | 485     |                          | 730   | 0,41 | 12,4                             |

A las series se le hicieron las pruebas de homogeneidad y aleatoriedad con la ayuda de los programas de computación que se utilizan usualmente, con resultados óptimos. En todos los casos el coeficiente de correlación (con sus respectivos análisis y depuraciones) utilizado fluctuó entre 0,82 Y 0,87.

#### **Determinación de las zonas vulnerables a inundación por intensas lluvias**

Fueron analizados los datos del expediente de la presa Hanabanilla correspondientes a igual fecha de ocurrencia de los fenómenos en el Valle de Jibacoa. Se pueden ver en la tabla 11 y 12 del anexo tabulado. Se realizó en la zona, después del paso del ciclón “Lily” en 1996, un bojeo alrededor del Valle, el cual permitió que se aforarán todos los arroyos que entran al mismo con un molinete pigmeo de barra para corrientes suaves, además se aforó en la salida del sumidero en un lugar donde se recogía todo el flujo de agua provenientes de las diferentes salidas de la formación cársica, incluyendo el que se escurría por las paredes de la misma.



Partiendo del resultado de los aforos realizados y con el apoyo de la curva área – volumen confeccionado para el Valle, se efectuó un pronóstico de vaciado del embalse artificial que resulto acertado, prácticamente sin margen de error. Se recomendó que no se construyera por debajo de la cota 340 msnmm, pues todas las obras que se encuentran por debajo de esa cota se ven afectada por la inundación.

Asimismo se contó con el resultado del levantamiento topográfico por las huellas de la avenida, por el que se pudo determinar que las afectaciones a los caminos, terraplenes y el vial Jibacoa – Topes de Collantes comienza en la cota 320 msnmm y las afectaciones a viviendas e instalaciones a partir de la cota 332 msnmm como se aprecia en la tabla 8 del anexo tabulado en el que se puede ver como se manifiesta a medida que aumenta la cota de inundación la vulnerabilidad estructural, vulnerabilidad social y vulnerabilidad económica. A así también se ve la vulnerabilidad ecológica. A partir de todo ese trabajo se montó una sección de 5 escalas, en la zona de la cooperativa Luis Lara, ubicándose la primera cerca del sumidero y la ultima bordeando la carretera.

Tabla 7. Sección de escalas

| Escalas    | Cotas (msnmm) |
|------------|---------------|
| Escala # 1 | 336.01        |
| Escala # 2 | 334.98        |
| Escala # 3 | 333.97        |
| Escala # 4 | 332.98        |
| Escala # 5 | 331.98        |

De esta forma se pueden medir los niveles y con la curva área- volumen determinar los volúmenes de agua remansados en el valle, producto de las inundaciones aunque en la actualidad solo se tiene registros de los acumulados en 48 h. Todos estos materiales auxiliares fueron analizados con el objetivo de corroborar el comportamiento de los fenómenos acaecidos en toda una región similar por sus características geomorfológicas. En la tabla 8 se muestran los estadígrafos correspondientes a las series de los equipos pluviométricos tomados como representativos.

Tabla 8 Resultados del procesamiento de las series.

| Cierre  | Nº del equipo | LLL (máx) (mm) | Xo (mm) | $\sigma$ | Cv   | Cs   |
|---------|---------------|----------------|---------|----------|------|------|
| Jibacoa | 316           | 492            | 150,0   | 95,75    | 0,63 | 2,29 |
|         | 922           | 578            | 145,5   | 106,5    | 0,73 | 2,36 |

En la tabla:

LLL lámina de lluvia máxima diarias

Xo lámina de lluvia media de la serie

$\sigma$  desviación típica de la serie

Cv coeficiente de variabilidad

Cs coeficiente de asimetría

### **Comportamiento de las precipitaciones y escurrimiento**

Para la determinación de las probabilidades de ocurrencia de las precipitaciones extremas se construyeron sus curvas respectivas, (en esos valores están incluidos los registrados en los días que

tuvieron lugar los fenómenos) utilizando las lluvias máximas diarias registradas en los equipos representativos.

Además fueron empleados los programas de computación “SKOL.1 y Gastos”, determinándose que para las precipitaciones ocurridas en la zona la probabilidad de ocurrencia oscila entre 0,7 y 1,3 % tal y como se expresa en la tabla 9.

Tabla 9 Probabilidades de ocurrencia de la lluvia.

| Pluviómetro | Precipitaciones Máximas (mm) | Probabilidad (%)    |        |                 |
|-------------|------------------------------|---------------------|--------|-----------------|
|             |                              | Fórmula de posición | Gumbel | Log-Pearson III |
| 316         | 492                          | 0,9                 | 0,8    | 1,3             |
| 922         | 578                          | 0,7                 | 0,8    | 1,0             |

A las series de lluvias máximas de ambos equipos le fueron aplicadas las pruebas de bondad de ajuste “Chi Cuadrado” y “Smirnov Kolmogorov”. Por esta vía se constató que las distribuciones que mejor se ajustan a estos valores son Gumbel para el 922 y Log-Pearson III para el 316, aunque es de destacar que estas diferencias están implícitas en los valores de lluvias máximas ocurridas en cada fenómeno, ya que como se conoce la ley de mejor ajuste para valores extremos es la de Gumbel ( $P_{máx} = 578$  mm equipo 922), mientras que el valor de 492 mm se aproxima más a los valores históricos de la media para ese lugar y por lo tanto se ajusta más a una distribución Log-Pearson III.

En el análisis efectuado a las series de las estaciones hidrométricas se constató el sincronismo del efecto de lluvias extremas en el escurrimiento, sobresaliendo en todos los casos los valores de ambas variables muy por encima de sus magnitudes máximas medias.

En el caso de los datos del embalse Hanabanilla se procesó la información del expediente de operación de la presa, específicamente se trabajó con los de lluvia y escurrimiento de los días en que tuvieron lugar los fenómenos acaecidos en el Valle de Jibacoa, con el objetivo de utilizar esos datos en la aplicación de la analogía hidrológica atendiendo las reglas planteadas. Entre otras las siguientes:

- Cercanía de la ubicación geográfica de la cuenca. Ambos cierres se encuentran en iguales condiciones geográficas.
- Similitud en las condiciones climáticas. Se cumple.
- La relación entre las áreas de las cuencas, permisible es hasta 10. La relación es 2,3; por tanto cumple.

Para corroborar los cálculos realizados para este lugar.

En el cálculo realizado primeramente se trabajó con la fórmula de los autores D.R. Sokolovsky y K.P.Voskresenski, que a continuación se expone, obtenida del libro “Problemas de Hidrometría y de Hidrología” del autor Llievedev, adecuada para las condiciones en Cuba.

$$Q_{MAX.CIERRE} = q_{MAX.ANUAL} \cdot \left( \frac{A_{ANALOGA}}{A_{CIERRE}} \right)^{0.27} \cdot A_{CIERRE} \quad 3.1$$

Donde:

$Q_{MAX.CIERRE}$  gasto máximo en el cierre de cálculo ( $m^3/s$ )

$q_{MAX.ANUAL}$  módulo del escurrimiento máximo en el cierre utilizado como análogo ( $m^3/s \text{ km}^2$ )

$A_{ANALOG}$  área del cierre utilizado como análogo ( $km^2$ )

$A_{CIERRE}$  área del cierre de cálculo ( $km^2$ )

Además, se trabajó con la Ingeniería Inversa, para lo cual se partió de los datos de nivel y volumen registrados en el expediente del embalse Hanabanilla y se calculó el tiempo de desplazamiento entre la avenida transformada y la de entrada al embalse, con el objetivo de compararla con la obtenida por el método de Alexeev G.A. (el cual se expone en el Capítulo 2). Se estableció una comparación entre ambos hidrógrafos obtenidos y como no se diferenciaban sustancialmente, se decidió trabajar en lo sucesivo con el de Alexeev G.A., por ser de mejor manejo por las veces en que se ha aplicado en trabajos territoriales.<sup>1</sup> De esa forma se obtuvieron las características del hidrógrafo de entrada a la presa Hanabanilla, y se corroboró el valor de  $Q_{\text{MÁXIMO}}$  para el 1,0 % de probabilidad, con el obtenido para ese mismo período de retorno para el Valle de Jibacoa con sus correspondientes volúmenes de avenidas. Los resultados por ambos métodos no sobrepasan el 15,0 % de error, por lo que se justifica el método empleado en estos cálculos que es el de Ingeniería Inversa.

En función de los parámetros específicos de cada lugar y aplicando las relaciones para la analogía fueron calculadas algunas de las características del escurrimiento en el Valle de Jibacoa para los diferentes años, las que se expresan en la tabla 10.

Tabla 10 Valores de gastos y volúmenes obtenidos por analogía.

| Años | Natural                       |                         |
|------|-------------------------------|-------------------------|
|      | Q(máx)<br>(m <sup>3</sup> /s) | W<br>(hm <sup>3</sup> ) |
| 1988 | 735                           | 48,55                   |
| 1996 | 538                           | 41,33                   |

Además se muestran los resultados obtenidos por la corrida del programa **HEC-HMS** teniendo en cuenta que el método empleado es **SCS Unit Hydrograph** en el cual se tiene en cuenta el **Lag-Time** que no es más que el tiempo que transcurre desde el centro de gravedad de la precipitación neta hasta la punta del hietograma y se considera igual a  $0.6 \times$  tiempo de concentración de la cuenca.

Tabla 11 Valores de gastos y volúmenes obtenidos por el programa HEC-HMS.

| Años | Natural                       |                         |
|------|-------------------------------|-------------------------|
|      | Q(máx)<br>(m <sup>3</sup> /s) | W<br>(hm <sup>3</sup> ) |
| 1988 | 733,50                        | 48,35                   |
| 1996 | 551,22                        | 40,91                   |

Como se puede apreciar las diferencias entre ambos resultados no son sustanciales.

### Construcción de las curvas de pronósticos hidrológicos en el Valle de Jibacoa

#### Determinación y clasificación de zonas de riesgo de inundación por intensas lluvias

Para la determinación de las curvas se analizaron las precipitaciones caídas en 24 horas y las acumuladas en 48 horas registradas durante la Depresión Tropical del Caribe en el año 1988, así como las del ciclón "Lily" en 1996. Las mismas fueron cuantificadas en los pluviómetros relacionados en la tabla 3.

Para este estudio se emplearon en el procesamiento y cálculo, materiales elaborados anteriormente para el Valle entre ellos la curva Área-Volumen, las cotas alcanzadas por los niveles de agua en las dos ocasiones (las que se pueden apreciar en la tabla 8 del anexo) y el gráfico de evacuación del embalse artificial que se creó en el Valle.

Las curvas  $[A = f_1(H)]$  ;  $[W = f_2(H)]$  y la curva de vaciado  $Q_{ev} = f(H)$  se utilizaron como herramientas de evaluación, para efectuar el cálculo del volumen de almacenamiento de agua, en función de las

precipitaciones caídas en el área de la cuenca y el coeficiente de escorrentía, determinado para la zona de acuerdo con los datos de los suelos de la cuenca con sus correspondientes velocidades de infiltración y la magnitud de la lluvia máxima para 24 horas, lo que expresa el grado de humedad existente en la cuenca en el momento de ocurrencia del fenómeno en el mencionado Valle de Jibacoa. Para ello se utilizó la expresión del coeficiente de escurrimiento obtenida del libro "Recomendaciones para calcular el escurrimiento máximo en los ríos de Cuba" de V. G. Bulat en 1969 (fórmula 24 de la página 28 del mencionado libro:

$$\eta = \left( 1 - \sqrt{\frac{K_f}{0,03H_p}} \right)^2 \quad 3.2$$

Donde:

$\eta$  coeficiente de escurrimiento

$K_f$  velocidad de infiltración del suelo

$H_p$  lluvia máxima de 24 horas (mm)

Partiendo de la lámina de lluvia caída en el primer día se determina el volumen inicial, con este en las curvas área y volumen en función del nivel se acotó la altura equivalente y con ella en el gráfico de evacuación se registra el caudal que se evacuó en el Valle; con el mismo se determina el volumen evacuado. El volumen acumulado en el Valle será la diferencia entre el volumen inicial y el que se evacuó, con el volumen almacenado. En la propia curva área - volumen se determinó la verdadera cota de inundación.

$$L_{esc} = L_{LL} \cdot \eta \quad 3.3$$

$$V_{inic} = L_{esc} \cdot A_{inf} \quad 3.4$$

$$V_{ev} = Q_{ev} \cdot t \quad 3.5$$

Donde:

$L_{esc}$  escorrentía (mm)

$L_{LL}$  lámina de lluvia caída (mm)

$V_{inic}$  volumen inicial (m<sup>3</sup>)

$A_{inf}$  área de influencia (km<sup>2</sup>)

$V_{ev}$  volumen evacuado (m<sup>3</sup>)

$Q_{ev}$  caudal evacuado (m<sup>3</sup>/s)

$t$  tiempo (s)

Este procedimiento se siguió para el segundo día y 48 horas, para ambos fenómenos, obteniéndose los valores para la confección de las curvas de trabajo, mediante las cuales se realizará el pronóstico. Dichas curvas con sus ecuaciones de regresión, el coeficiente de potencia de la correlación ( $R^2$ ) y el error de la correlación ( $er$ ) se pueden ver en el anexo gráfico 5, 6, 7 y 8. En el anexo gráfico 9 se muestran dichas curvas como un gráfico combinado y sus principales valores se encuentran tabulados en la tabla 15. También se dan las curvas área - volumen y de evacuación para el Valle en los anexos gráficos 2,3 y 4.

#### Validación de la curva de pronóstico

En la madrugada del 25 de Septiembre de 1998, afectó al país el huracán “Georges”, registrándose en el Valle precipitaciones en el orden de los 150,00 mm que no provocaron inundaciones considerables, comprobándose de esta forma el punto inicial de la curva o de partida en el pronóstico que con este estudio se brinda.

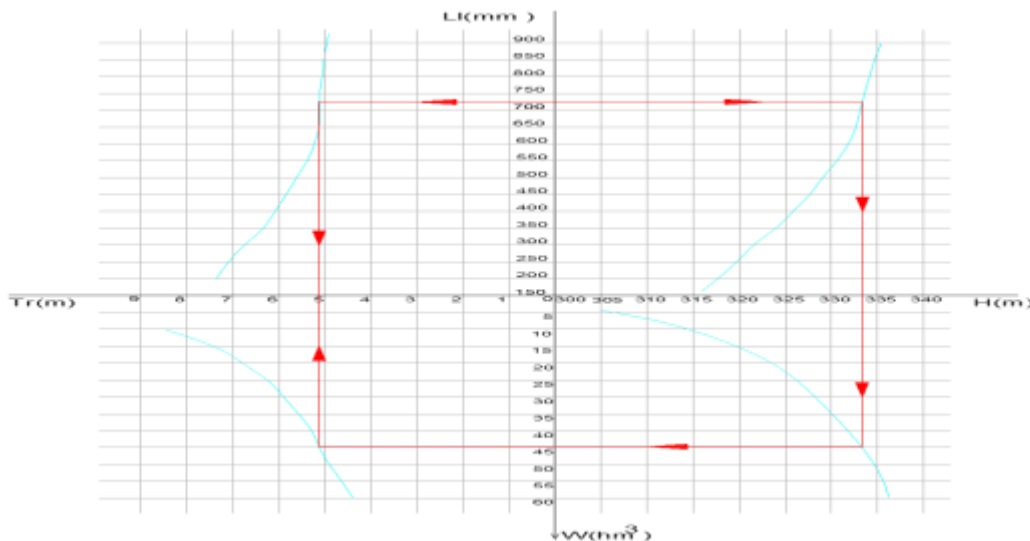
Del 14 al 16 de Octubre de 1999, afectó al país el huracán “Irene”, dejando en el Valle precipitaciones en el orden de los 720,00 mm, las cuales provocaron inundaciones considerables. La cota de inundación alcanzada fue de 333,37 msnmm., acumulándose un volumen de 42,00 hm<sup>3</sup> cuantificados.

El valor de las precipitaciones en el gráfico de pronósticos dio como resultado una cota de inundación de 333,25 msnmm, el volumen de inundación fué de 44,50 hm<sup>3</sup> para un tiempo de retardo de 5,15 horas.

Del 7 al 10 de Julio de 2005, afectó al país el huracán “Dennis”, registrándose en el Valle precipitaciones en el orden de los 503,00 mm, las cuales provocaron inundaciones considerables. La cota de inundación alcanzada fue de 332,55 msnmm, acumulándose un volumen igual a 35,00 hm<sup>3</sup> cuantificados.

El valor de las precipitaciones en el gráfico de pronósticos dio como resultado una cota de inundación de 330,70 msnmm, el volumen de inundación de 34,00 hm<sup>3</sup> para un tiempo de retardo de 5,59 horas.

Como se puede apreciar estos valores difieren en un 5,0% como promedio de los registrados en el Valle de Jibacoa. Esto, como se podrá apreciar, corrobora la certeza de la metodología de base propuesta para la elaboración de la dependencia lluvia vs escurrimiento en el mencionado lugar y por su operatividad y simpleza resulta confiable para la toma de decisiones de los órganos correspondientes a la hora de determinar hasta donde es factible la evacuación del lugar.



| Llamina Lluvia | Cota   | Volumen | Tiempo Retardo |
|----------------|--------|---------|----------------|
| 720            | 333,25 | 44,80   | 5,15           |

## CONCLUSIONES

1. El pronóstico de la posible avenida a producirse como consecuencia de las lluvias de un evento meteorológico, reviste una enorme importancia y constituye una herramienta eficaz para tomar medidas de mitigación con las cuales contrarrestar los daños al ecosistema agregado, la flora y la fauna locales, así como afectaciones a la población y economía del lugar.
2. La selección del modelo de ley de distribución a adoptar para el análisis de las lluvias máximas no es un tema sobre el que exista consenso.

3. En los diferentes modelos de pronósticos consultados en la literatura se puede apreciar que la precipitación es la variable independiente, siendo la escorrentía, la intensidad y la humedad en la cuenca, entre otros, las variables dependientes. Así como los modelos matemáticos que surgen dan solución a sistemas de ecuaciones no lineales.
4. La metodología propuesta resulta sencilla y de la operatividad necesaria para la toma de decisiones sobre la evacuación de personas o bienes de la economía Nacional a la hora de tener lugar fenómenos meteorológicos de cierta consideración, que por lo general traen afectaciones serias al Territorio. La misma no requiere de equipamiento sofisticado para su utilización.
5. Los cálculos realizados para corroborar los resultados obtenidos de las inundaciones en el Valle de Jibacoa fueron sometidos a comprobación por el método de analogía hidrológica con la utilización de datos reales que obran en el expediente de operación de la presa Hanabanilla-Jibacoa.
6. Las series de los equipos analizados son: aleatorias, homogéneas y presentan buenas correlaciones.
7. La serie del equipo 922 se ajusta a la ley de distribución Gumbel y la serie del equipo 316 se ajusta a la ley de distribución Pearson III.
8. Las curvas de pronóstico han sido validadas en tres ocasiones después de su realización, en el año 1998, 1999 y 2005 respectivamente con resultados satisfactorios. Esto corrobora lo expresado en el texto sobre la sencillez y operatividad de la metodología utilizada y propuesta para el pronóstico.

## RECOMENDACIONES

- ✚ Los gráficos presentados en el trabajo pueden ser utilizados por los órganos de la Defensa Civil del lugar para la toma de decisiones a la hora de evacuar personal o recursos de la economía, con lo que se mitigarán las afectaciones que puedan producir los eventos hidrometeorológicos extraordinarios.
- ✚ Trabajos similares pueden ser realizados en otras cuencas con características similares a las del Valle de Jibacoa, donde la capacidad de evacuación de las aguas producidas por las precipitaciones sea inferior a la de almacenamiento de grandes volúmenes de escorrentía. Para ello puede ser utilizada la metodología propuesta en este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Andrade Pérez, A (2004): Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integrada del recurso hídrico. PNUMA, Red de Formación Ambiental. México. DF.
2. Álvarez Cedeño, R., Betancourt Lavastida, JE., Puig González, MA., (2010): Fortaleza frente a huracanes (1959-2008). Editorial Científico Técnico. La Habana.
3. Alexeev G.A. "Métodos generalizados para el cálculo del escurrimiento máximo basado en el principio de la intensidad extrema y recomendaciones sobre la utilización en los ríos de Cuba". Dirección de Investigaciones Sistemáticas Departamento de Hidrología. Grupo Hidráulico Nacional D.A.P La Habana, 1973.
4. Chanson, H., (2009) Application of the Method of Characteristics to the Dam Break Wave Problem Journal of Hydraulic Research, Vol 47, pp 41-49.
5. CENTRO DE HIDROLOGIA Y CALIDAD DE LAS AGUAS (CENHICA) Regulación técnica y metodológica para la complementación del Decreto Ley No 138 las aguas terrestres en materia de hidrología y calidad de las aguas. INRH, Enero 1997.
6. Conesa, (2000).Matriz de Importancia
7. Estado Mayor de la Defensa Civil (EMDC ), (2005): Directiva 1 del Vicepresidente del Consejo de Defensa Nacional para la organización, planificación y preparación del país para las situaciones de desastres.
8. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Resolución 52/2007. "Reglamento del Consejo Nacional, de los Consejos Territoriales y de los Consejos Específicos de Cuencas Hidrográficas".
9. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente., Grupo de Evaluación de Riesgos., (2008) Resumen ejecutivo provincial. Estudio de peligro vulnerabilidad y riego.
10. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente., (2011-2015): Estrategia Nacional de Medio Ambiente.

11. Marius Lancea Adrian -.. Abreu Franco D.E - Portieles Pérez Fernando L. “ Grupo de programas para el pronóstico de inundaciones en una cuenca ” .Voluntad Hidráulica 81 año 1989.
12. Llevedev, “Problemas de Hidrometría y de Hidrología”.
13. V. G. Bulat, (1969) “Recomendaciones para calcular el escurrimiento máximo en los ríos de Cuba”.