

METODOLOGIA GEOMÁTICA PARA LA GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS EN PELIGRO DE INUNDACIÓN EN BARRANCAS URBANAS

Dr. Felipe Omar Tapia Silva
Mc. Juan Manuel Nuñez
Mc. Daniel López López

Centro de Investigación en Geografía y Geomática
“Ing. Jorge L. Tamayo” AC (CENTROGEO)
México DF

Resumen

Un modelo distribuido lluvia-escorrentía y sus resultados expresados espacialmente mediante la definición de zonas de peligros de inundación en barrancas urbanas son presentados en este artículo. Los caudales y las áreas de inundación fueron definidos básicamente a partir del modelo lluvia-escorrentía y un mapa de posición topográfica. Las diferentes tormentas de diseño están definidas por mapas de precipitación para distintos periodos de retorno. Procedimientos de interpolación mediante kriging ordinario fueron aplicados para espacializar datos de precipitación extrema para 24 horas. Generadas estas superficies de precipitación máxima los datos fueron expresados en datos de precipitación horaria de acuerdo a factores disponibles para regionalización de lluvias. El modelo incluye la aplicación del método del número de curva del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), para reducir la cantidad de precipitación a un valor de escurrimiento en función del uso y tipo de coberturas terrestres y del mapa de tipos de suelos. El mapa de coberturas fue generado mediante la clasificación supervisada de una imagen Landsat 7 de 2002. El modelo de conectividad hidrológica superficial fue definido a partir del procesamiento de un modelo elevación digital (SRTM), calculando direcciones y acumulaciones de flujo y áreas de captación de acuerdo a umbrales para definir segmentos del sistema de drenaje. Las acumulaciones de flujo fueron útiles para expresar cuanta agua se acumula sobre las líneas de drenaje. Una importante aportación de este trabajo consiste en la metodología propuesta para generar el mapa de zonas potencialmente inundables. En este caso el volumen de gasto específico sobre las líneas de drenaje se expresa espacialmente mediante la implementación de un algoritmo que caracteriza la topografía local en relación a su contexto espacial.

1. INTRODUCCIÓN

Los patrones de uso y cobertura de suelo ejercen una influencia directa sobre los elementos del ciclo hidrológico (cf. Endreny et al. 2003). Esta situación se observa más claramente en zonas en proceso de urbanización, en las que la impermeabilización de superficies modifica drásticamente la partición de la precipitación en evaporación, infiltración y escorrentías e incide en la generación de factores de peligro tales como avenidas extremas y deslaves. En la Ciudad de México, los episodios convectivos de lluvia muy intensa, tienen graves efectos de inundaciones sobre todo en el poniente de la ciudad (Jáuregui, 2001).

La geomática, como ciencia y como tecnología, aporta una serie de elementos teórico-prácticos de análisis espacial fundamentales para desarrollar las actividades de modelación hidrológica distribuida, que permiten definir con mayor precisión el estado actual de los recursos hídricos en áreas geográficas y apoyar la generación de iniciativas ciudadanas y políticas públicas tendientes a aportar elementos para la solución de tal problemática.

En este estudio se presenta un modelo distribuido lluvia-escorrentía y sus resultados expresados espacialmente mediante la definición de zonas de peligros de inundación en barrancas urbanas. El estudio no incluye un modelado hidráulico. Los gastos en todo el territorio son calculados a partir del modelo lluvia-escorrentía y “ruteados” sobre la red de drenaje para el tiempo considerado de incidencia de precipitación.

2. METODOLOGIA BASADA EN ELEMENTOS DE GEOMÁTICA

La metodología desarrollada en este estudio para la generación de mapas de inundación utilizando elementos de geomática, se basa en la utilización de mapas de precipitación, de un modelo distribuido lluvia-escorrentía y un mapa de posición topográfica obtenido a partir de un Modelo Digital de Elevación (MED). Tal metodología requiere el uso combinado de diferentes modelos y bases de datos geoespaciales, los cuales son manipulados y transformados mediante la implementación de modelos cartográficos que se definen en el esquema de la ilustración 1. Los mapas de precipitación se generaron a partir de determinaciones estadísticas de lluvias intensas mediante periodos de retorno. Los mapas de valores de gastos para periodos de tiempo reducidos (30 minutos) se obtuvieron a partir de mapas de precipitación diaria mediante la aplicación de fórmulas empíricas generadas por Mendoza (2001). Las zonas inundables son generadas comparando el volumen de gasto específico y el volumen de los caudales de inundación definidos a partir de las diferentes unidades de posición topográfica.

Los insumos cartográficos de este estudio fueron: un MED obtenido a partir de la misión SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), un mapa de suelos de acuerdo a la clasificación de FAO (*Food and Agriculture Organization*) publicado por INEGI, un mapa de coberturas terrestres surgido a partir de una clasificación no supervisada de una imagen Landsat 7 del 2002 y mediciones de lluvias extremas en estaciones climatológicas de la zona de estudio.

En los siguientes párrafos se explica la aplicación de los elementos de geomática y de análisis espaciales requeridos para la generación de los mapas de peligro de inundación.

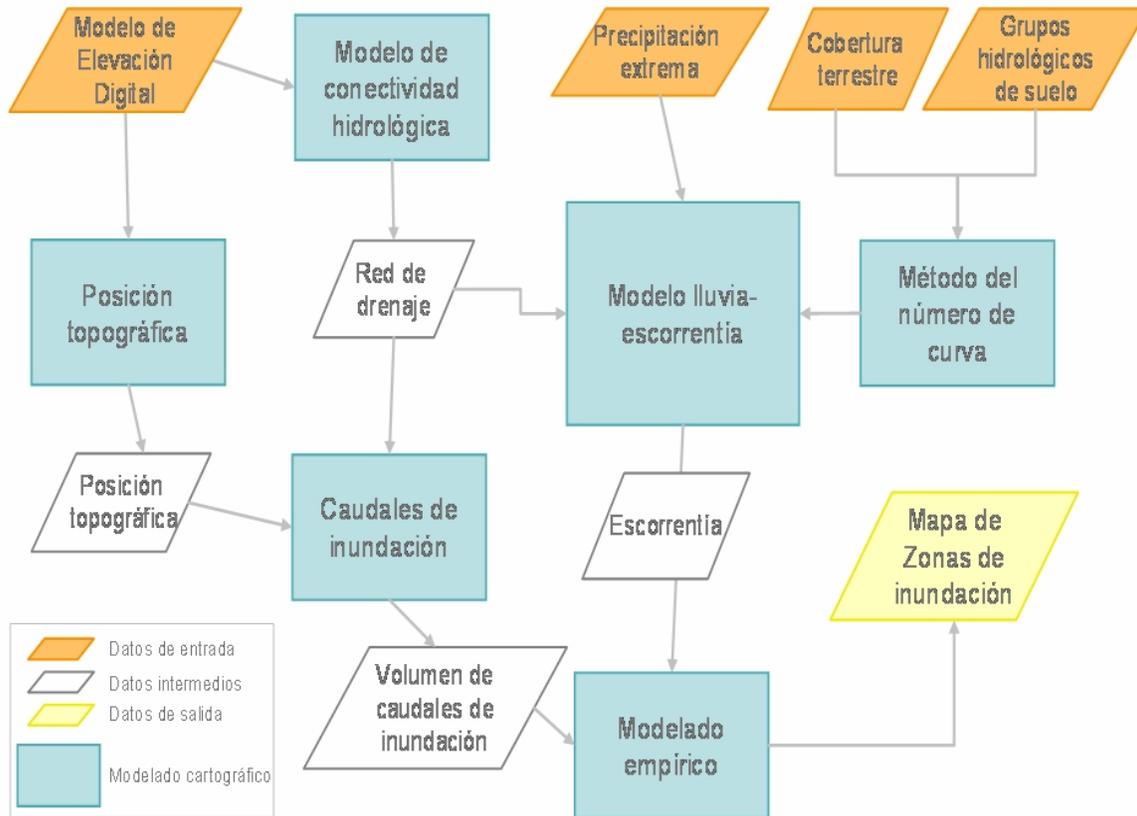


Ilustración 1: Esquema de la metodología para la generación de cartografía de peligro de inundación mediante elementos de geomática.

Definición del modelo de conectividad hidrológica superficial

Los modelos de elevación digital (MED) son registros digitales de elevaciones de terreno para posiciones terrestres en intervalos horizontales regulares, normalmente derivados de mapas topográficos a través de datos hipsométricos o métodos fotogramétricos o por procedimientos de percepción remota particulares. Se utilizan como insumo principal para definir patrones de conectividad hidrológica superficial de áreas geográficas de captación pluvial (AC), en función del gradiente de pendientes del área de estudio. Este proceso es realizado de acuerdo con el modelo raster de extracción de información de la estructura topográfica, propuesto por Jenson y Domingue (1998). Una ventaja importante del procedimiento radica en la posibilidad de hacer una delimitación jerárquica de las AC, de forma tal que las de menor tamaño se insertan perfectamente, en las de mayor tamaño, en cuanto a límites geográficos y a la definición de las redes de drenaje, mismas que son funcionales a todos los niveles de delimitación de AC. Considerando lo anterior, el tamaño de las AC puede ser definido tan grande o tan pequeño como sea requerido para los fines específicos del estudio científico o del proyecto para generar información de apoyo a la toma de decisiones.

La premisa fundamental del modelo de conectividad hidrológica superficial implementado para la definición de los sistemas de escurrentía es que el agua fluye en la dirección de mayor pendiente. De acuerdo con el sistema de Jenson & Dominge (1998) en un MED existen al menos ocho celdas colindantes a cada celda y por tal motivo el flujo es posible en alguna de esas ocho direcciones, mismas que por convención están determinadas como $2x$ con $x = \{0,1,\dots,7\}$. El cálculo de direcciones de flujo está basado en la definición de la gradiente de mayor pendiente del centro de cada celda hacia el centro de las células circunvecinas. De esta forma es posible obtener un mapa raster de direcciones de flujo. La definición de acumulaciones de flujo constituye el siguiente paso para la definición del sistema de drenaje. El mapa correspondiente es creado a partir del de direcciones de flujo y registra cantidad de celdas que fluyen hacia otra en particular. Existe la posibilidad de que el flujo de una celda no alcance el punto de salida del área de captación, esto puede ser provocado por fallas al generar el MED o por escalas “insuficientes”. En tal caso, Maidment (2000) recomienda la aplicación de procedimientos para corregir esas imprecisiones del modelo o mediante el procedimiento denominado “quemado” del MED, lo cual conlleva a una elevación artificial de las zonas de parteaguas, de forma tal que se asegure el flujo hacia zonas mas bajas. La definición de las corrientes se realiza utilizando un valor límite de acumulaciones de flujo, es decir un valor límite de celdas, que indica si en la celda en cuestión la cantidad de celdas que fluyen a ella, es mayor a ese valor. En tal caso la celda deber ser considerada como parte de la red de drenaje. El encadenado de corrientes es una función para segmentar la red de corrientes (definir sus componentes e identificarlas), establecer ligas para crear la denominada red de drenaje y asignar el identificador de las AC. Para definir rutas de drenaje, a cada celda en un corriente se asigna mismo número. Como salida del encadenamiento de corrientes se produce un mapa conteniendo indicadores únicos sobre cada segmento de la red de drenaje y a las demás celdas se les asigna un valor nulo. Lo anterior fue desarrollado en este estudio utilizando un MED.

Mapa de posición topográfica

La posición topográfica es uno de los atributos más comunes de las geofomas, que se utiliza en los estudios de suelos, geología y vegetación. Numerosos procesos físicos asociados con el crecimiento y ocurrencia de especies vegetales, propiedades del suelo y tipos de suelos, están correlacionados con la posición topográfica. La posición topográfica es dependiente de la escala; así el mismo punto en la cresta de una montaña se puede considerar como un pico o un área plana dependiendo de la escala de análisis. La escala es determinada por la vecindad usada en el análisis. Los valores de la posición topográfica reflejan la diferencia de elevación de una celda en particular y la elevación promedio de las celdas vecinas.

El calculo de la posición topográfica se realizó mediante el algoritmo propuesto por (Zimmermann, 2000). Para ello se generó una imagen donde se identifica la posición topográfica. La posición topográfica se obtiene como la diferencia entre el valor de elevación de una celda y la elevación promedio de las celdas vecinas a dicha celda. En este algoritmo, se aplica al MDE una ventana circular móvil con radio creciente y se calcula la diferencia entre la elevación promedio de la ventana considerada y la celda central. Este valor se escribe a un archivo temporal. El programa escrito en AML incrementa el radio de

búsqueda (y repite los cálculos para cada radio) hasta que el radio incrementado sea mayor que el máximo radio. Al final se integra jerárquicamente, en un solo mapa, los archivos temporales generados. El algoritmo requiere los siguientes parámetros de entrada: radio menor, radio mayor de la ventana de búsqueda y el incremento para mover la ventana de cálculo. Como se mencionó, la posición topográfica es dependiente de la escala, en este caso controlada por el tamaño de las ventanas. Para la selección de los radios adecuados en las ventanas, se tomó como guía la imagen de clasificación de las curvaturas y la imagen que representa los rasgos del terreno. La posición en el paisaje puede ser interpretada como una cresta o un pico si la celda central en la ventana móvil tiene una elevación más alta que la elevación promedio en las celdas de la ventana. En caso contrario, la celda central se interpreta como un pie de ladera o un valle inferior. Finalmente dado que la posición topográfica no considera la curvatura de las laderas, se hizo una corrección en las laderas por la curvatura, utilizando para ello las imágenes de la curvatura plana y vertical.

Espacialización de cálculos de lluvias extremas

Se calcularon periodos de retorno de 10, 50 y 100 años para de todas las estaciones de la Cuenca del Valle de México, utilizando la distribución de valores extremos tipo I (Gumbel standard) en su expresión del extremo superior, cuya ecuación es:

$$f(x) = e^x e^{-e^x}$$

En donde x es el valor extremo durante un año para la variable de interés en la estación climatológica específica y e es la constante para calcular logaritmos naturales. La distribución Gumbel es utilizada para análisis de la distribución asintótica de extremos muestrales correspondientes a condiciones climatológicas extremas. Los valores obtenidos mediante el cálculo de cada estación fueron procesados para obtener mediante el proceso de Kriging ordinario los mapas de precipitaciones extremas para los periodos de retorno considerados. De esta forma las diferentes tormentas de diseño fueron definidas por los mapas de precipitación para distintos periodos de retorno. En concreto, se optó por manejar tormentas de 30 minutos mediante la aplicación de fórmulas empíricas (Mendoza, 2001) para obtener los caudales máximos instantáneos en diferentes puntos de la red de drenaje

Determinación distribuida de escorrentías

Una vez definido el sistema de conectividad hidrológica superficial del área geográfica, expresado en áreas de captación interconectadas mediante un sistema de drenaje específico, se procedió a la determinación distribuida de escorrentías aplicando el método del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) de los EU. El método es descrito en detalle en NEH-4 (SCS 1985) y en TR-55 (USDA 1986). Durante los últimos años, el método CN ha sido utilizado por varios investigadores debido a que aporta resultados útiles que pueden ser obtenidos con costos mínimos en cuanto a costo y tiempo de procesamiento (Rao et. al., 1996; Sharma et al. 2001; Chandramohan y Durbude, 2001; Sharma y Kumar, 2002, Coskun 2005). El método esta basado en la definición de pérdidas de precipitación en función de la intensidad misma de los eventos de precipitación y de la cantidad de agua que puede ser almacenada en el suelo. El método permite el cálculo de

escorrentía de tormenta individual, o precipitaciones semanales, mensuales o anuales mediante las expresiones:

$$Q = (P - 0.2 S)^2 / (P + 0.8 S) \quad \text{y} \quad S = 1000 / CN - 10$$

Con Q : escorrentía (mm), P : precipitación (mm), S : cantidad de P (mm) absorbida por el suelo. Cuando el número de curva (CN), asociado con alguna cobertura específica de suelo, es igual a 100 implica que la precipitación escurre 100% y cuando CN es igual a uno la precipitación se infiltra en su totalidad. CN considera condiciones antecedentes de humedad del suelo. Para el caso de esta aplicación se tomaron como intermedias. Los números de curva se definen para cada uno de las coberturas de suelo definidas y para los grupos hidrológicos de suelos de acuerdo a tablas disponibles (e.g. en TR-55 USDA 1986).

Generación de mapas de peligro de inundación

Una vez realizado el cálculo de volúmenes de escorrentía superficial sobre la red de drenaje a través de la obtención de acumulaciones de flujo, los resultados fueron comparados con los volúmenes o capacidades máximas de inundación definidos por las unidades de posición topográfica. Las capacidades máximas de inundación fueron definidas mediante la segmentación de las unidades del paisaje topográfico inundables (específicamente para pies de laderas y valles, ver ilustración 2) a alturas predeterminadas. Para ello se procedió primero a seleccionar las unidades que estuvieran dentro de la red de drenaje definida como se describió arriba. Después se obtuvo para cada segmento de las unidades la altura mínima y el promedio de la altura máxima del mismo segmento. Con su área y con este diferencial de alturas fue posible obtener el volumen o capacidad máxima de cada segmento de las unidades.

Las zonas de inundación para las diferentes tormentas de diseño corresponden a áreas geográficas en donde los volúmenes de escorrentía superficial son mayores a los volúmenes de los caudales de inundación definidos para cada uno de los segmentos de las unidades inundables del paisaje topográfico. Estos mapas se reclasificaron para obtener tres valores cualitativos de peligro de inundación: peligro bajo, para cuando el volumen de inundación sólo cubre las zonas más profundas de los caudales de inundación. peligro medio, para cuando el volumen de inundación cubre las zonas medias y altas de los caudales de inundación, y peligro alto, cuando el volumen de inundación cubre hasta las partes altas unidades del paisaje topográfico inundables, es decir pie de laderas y valles) .

3. RESULTADOS

Concordando con los procedimientos indicados por el modelo cartográfico (ilustración 1), en la ilustración 2 se muestran los mapas de entrada que fueron obtenidos y utilizados para generar los mapas de áreas en peligro de inundación. El resultado de la implementación del algoritmo de definición de posición topográfica se muestra en la ilustración 3.

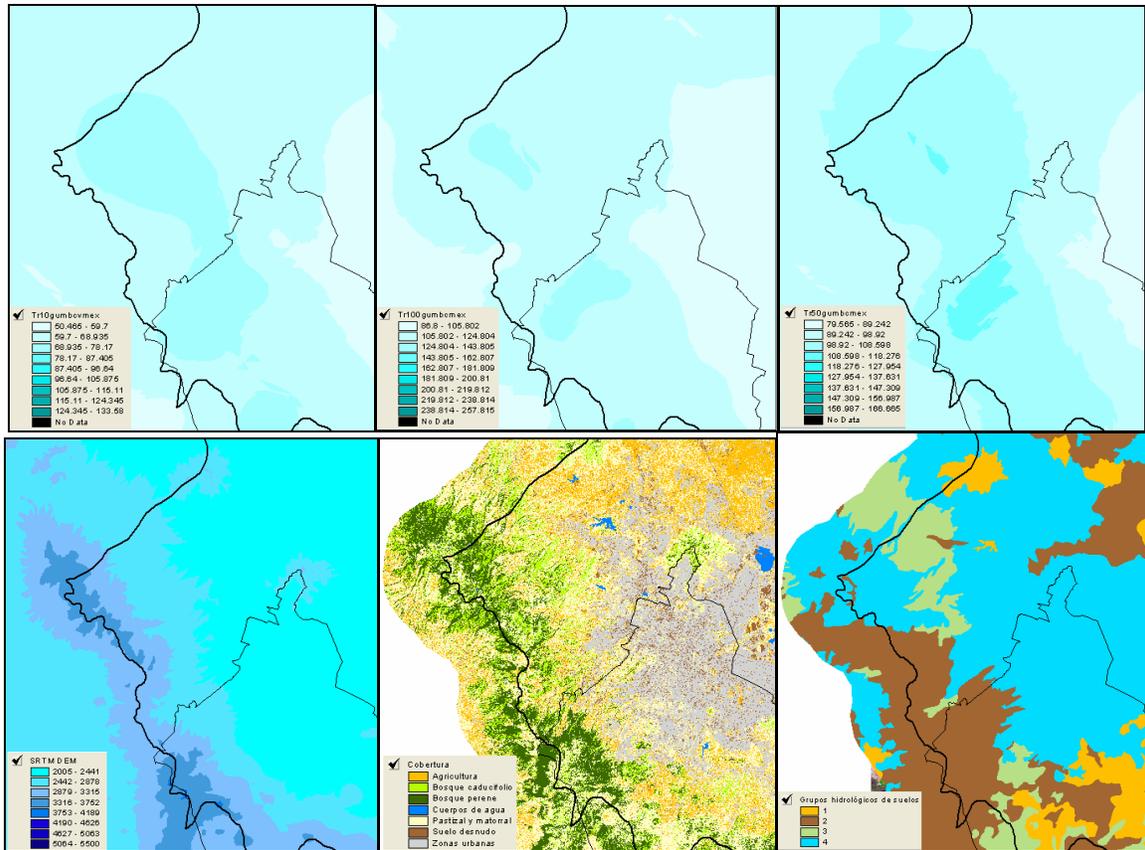


Ilustración 2: Mapas de entrada al modelo para generación de áreas de inundación (arriba: precipitación para períodos de retorno de 10, 50 y 100 años, abajo: modelo de elevación digital, coberturas de suelos a partir de imagen clasificada landsat 7 2002 y grupos hidrológicos de suelos)

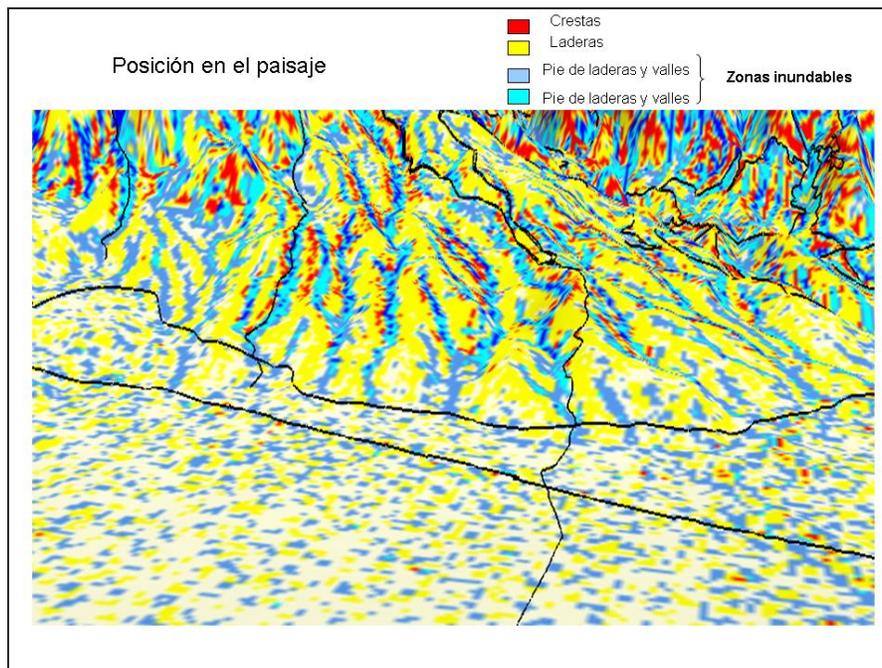


Ilustración 3: Definición de unidades de posición topográfica

Los mapas obtenidos como resultado de la implementación del modelo distribuido de zonas en peligro de inundación para diferentes periodos de retorno son mostrados en la ilustración 4.

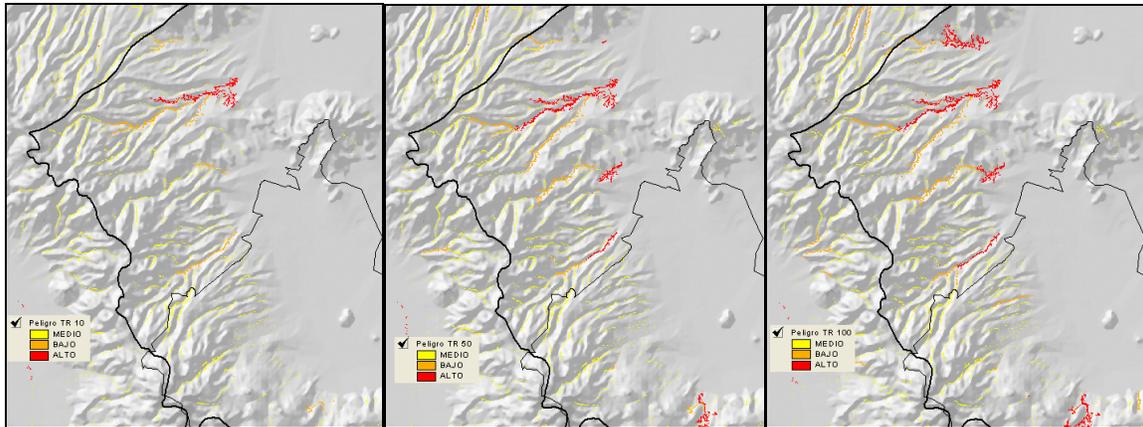


Ilustración 4: Zonas en peligro de inundación para diferentes periodos de retorno (10, 50, 100) definidas en 3 niveles de inundación de los cauces (alto, medio, bajo)

Los resultados de esta investigación se encuentran en proceso de validación y calibración. A nivel de validación preliminar se presentan en la ilustración siguiente (5) mapas con las en peligro de inundación visualizando a una escala mas fina los puntos con reportes de alguna ocurrencia histórica de inundaciones (proporcionada por la secretaría de medioambiente del gobierno del DF). Es posible establecer una buena coincidencia entre los puntos reportados y las áreas definidas en peligro de inundación. En versiones posteriores de este estudio se presentaran los resultados con la inclusión de un modelo hidráulico que permita calcular variables como el tiempo de concentración en toda la red de las líneas de drenaje.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron un modelo distribuido lluvia escorrentía y sus resultados expresados espacialmente como zonas de peligro de inundación súbita en zonas de barrancas urbanas. Debido a que normalmente los levantamientos topográficos son imprescindibles para generar este tipo de mapas de peligros de inundación, la metodología propuesta para generar el mapa de zonas inundables a partir de modelos de elevación digital (es decir sin necesidad de levantamiento topográfico de perfiles transversales de canales en campo) es una importante aportación. La metodología y resultados presentados están aún en etapa de desarrollo y se planea realizar actividades más rigurosas de validación de los mismos y de refinación de procesos. En caso de contar con resultados positivos al final de estudio, se podrá contar con una herramienta muy útil, que podrá ser aplicada eficientemente en términos de costos en cuanto a tiempo y recursos económicos.

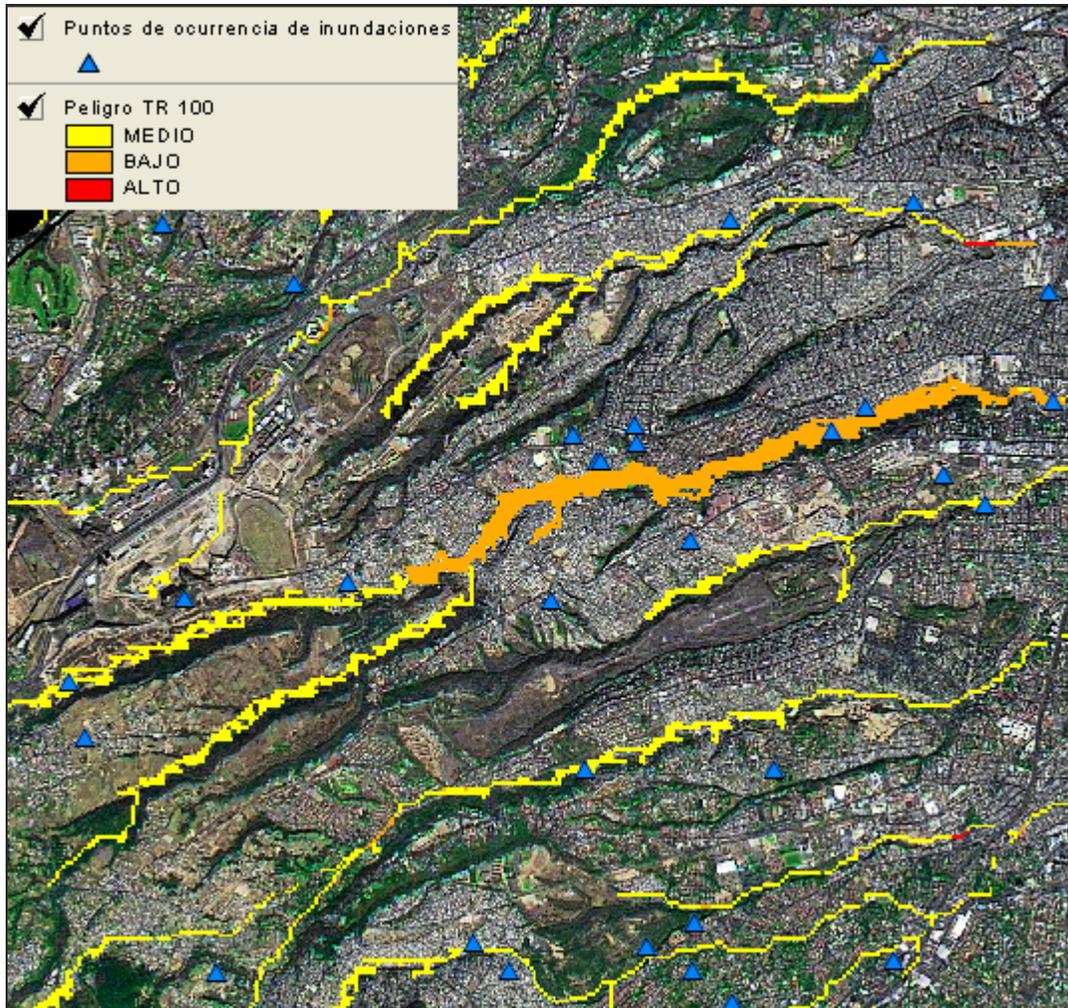


Ilustración 5: Zonas en peligro de inundación en barrancas urbanas del poniente del DF correspondiendo con puntos de ocurrencia de inundaciones

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Coskun M., Musaoglu, N., Hýzal A. 2005. Prediction of Hydrological Model of Yuvacik Catchment by using Remote Sensing and GIS Integration. Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. Saint Petersburg, June 20-24. Available on line at: <http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/756.pdf> (last accessed August 9, 2005)
- Endreny, T.A., Somerlot, C. and Hassett, J.M. 2003. Hydrograph sensitivity to estimates of map impervious cover: a WinHSPF BASINS case study. *Hydrologic Processes* 17, 1019–1034
- Jáuregui, E. 2001. Las precipitaciones extremas en la Ciudad de México. II Congreso de la asociación española de climatología. España. Pp 325-334

- Jenson S.K. y Domingue O. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 54 No. 11 November pp. 1593-1600
- Maidment D. V. (Editor). 2000. "ArcGIS Hydro Data Model. Draft Data Model and Manuscript". 20th Annual ESRI User Conference. San Diego California
- Mendoza, M. 2001. Factores de regionalización de lluvias máximas en la República Mexicana. Tesis de maestría en ingeniería hidráulica. UNAM. México. 74 p.
- Rao, K.V., Bhattacharya, A.K. and Mishra, K. 1996. Runoff estimation by curve number method- case studies, *Journal of Soil and Water Conservation*. 40 :1-7
- Sharma, D. y Kumar, V. 2002. Application of SCS model with GIS data base for estimation of runoff in an arid watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*: 30 (2):141-145
- Sharma, T., Satya Kiran, P.V., Singh, T.P., Trivedi, A.V. y Navalgund, R.R. 2001. Hydrologic response of a watershed to landuse changes: A remote sensing and GIS approach. *International Journal of Remote Sensing*: 22 (11): 2095-2108
- Soil Conservation Service (SCS). 1985. National engineering handbook. Section 4- Hydrology. Washington, DC.
- U. S. Department of Agriculture (USDA). 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55. Second Edition June 1986. USDA. Washington DC.
- Zimmermann, N. 2005. Disponible en: http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/programs/aml4_1.html