

Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, estado Trujillo-Venezuela

Use of the topographic wetness index (TWI) for the diagnosis of the river overflow threat, Trujillo State-Venezuela

Roa-Lobo José¹ y Kamp Ulrich²

Recibido: marzo 2010 / Aceptado: abril 2011

Resumen

En este trabajo la localización óptima para la construcción del Hospital del Seguro Social del municipio Trujillo fue determinada tomando en consideración dos condicionantes: la primera, referida a la disponibilidad de terrenos municipales, que para la fecha de este análisis se limitaba al área comprendida entre el río Castán y el eje vial Valera-Trujillo. La segunda tiene que ver con la susceptibilidad a inundación por detritos a que están sujetos estos terrenos. Se plantea entonces el desarrollo de un análisis de amenaza de inundación por desborde fluvial que sugiera cuáles terrenos en el área, podrían albergar infraestructura con un mínimo relativo de vulnerabilidad a inundaciones. La zonificación de la amenaza por inundación de detritos se determinó a partir de los niveles de concentración del escurrimiento superficial, calculados principalmente a través del índice topográfico de humedad (ITH), e información espacial derivada, la cual es finalmente integrada a través de un modelamiento booleano.

Palabras clave: Índice topográfico de humedad; modelo de localización; inundación de detritos.

Abstract

In this analysis, an optimal location for the building of the new Trujillo's Social Service Hospital was determined by taking into account two main constraints: The first one is related to land availability, which by the time of this study was limited to the area between the River Castán and the Valera-Trujillo highway. The second constraint is the susceptibility of this area to debris flood processes. Therefore a debris flood hazard analysis for the area is applied to set which zones can potentially hold the hospital's infrastructure within a minimum of flood vulnerability. This hazard analysis is mainly based on the spatial distribution of soil moisture and surface saturation, computed by the topographic wetness index (TWI), together with other derived spatial information, which was finally integrated by means of a Boolean model.

Key words: topographic wetness index; location model; debris flood.

1 Universidad de Los Andes, Grupo Geociencias, Área de Geografía, Trujillo-Venezuela. Correo electrónico: roajose@ula.ve

2 Universidad de Montana, Departamento de Geografía, Missoula-EEUU. Correo electrónico: Ulrich.kamp@mso.umt.edu

1. Introducción

El presente trabajo surge como una respuesta preliminar al problema de la ubicación del nuevo edificio del Hospital del Seguro Social en el estado Trujillo, Venezuela. El municipio Trujillo está conformado casi en su totalidad por la cuenca montañosa del río Castán la cual, por su localización transversal al eje mayor de la cordillera de Mérida, ofrece muy pocos terrenos con bajas pendientes donde se pueda construir infraestructuras de uso público, con servicios de alta demanda, como el correspondiente a un hospital de alcance regional. La Alcaldía de Trujillo sometió a consideración del Minis-

terio del Poder Popular para la Salud, un único terreno municipal plano paralelo al río Castán y al eje vial Trujillo-Valera (Figura 1) para, eventualmente, construir el nuevo hospital. Simultáneamente un grupo profesional realizó una inspección al lugar para determinar la viabilidad de la construcción dada su aptitud geomorfológica. La inspección no fue orientada a descartar o recomendar el terreno en discusión, sino a ampliar el conocimiento de la dinámica geomórfica de éste y, de esta manera, respaldar el diseño de soluciones de ingeniería que mitiguen y corrijan potenciales inundaciones.

Dado que la topografía es un factor de primer orden en el control de la variación

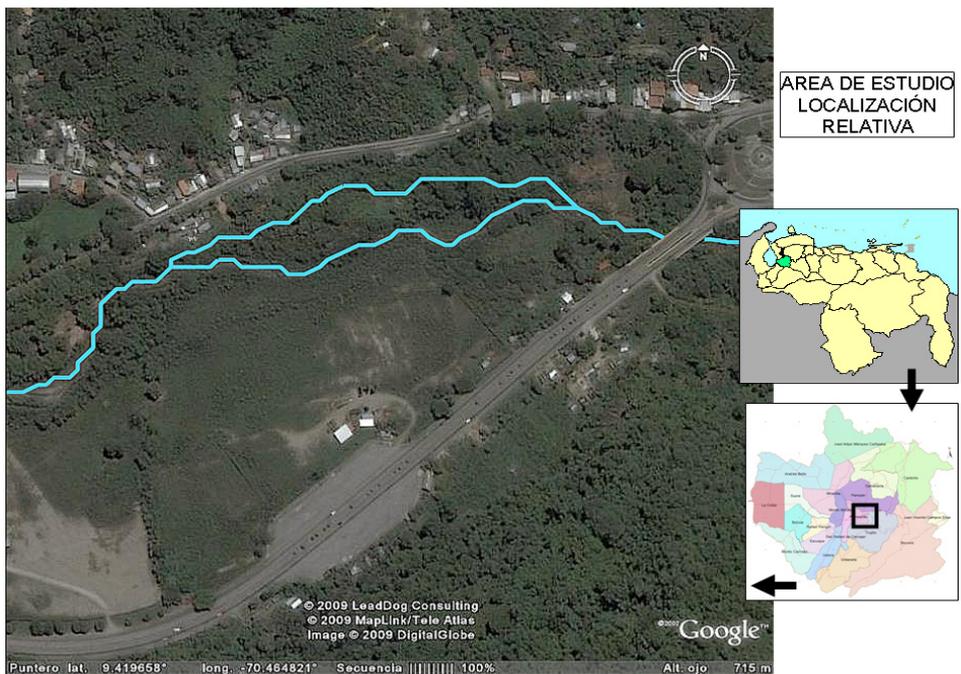


Figura 1. Localización relativa del área de estudio, coordenadas centrales N9, 419535, O70, 465543. Cortesía de Google Earth [última consulta: 12-05-2009]

espacial de las condiciones hidrológicas (Sorensen *et al.*, 2005), en este trabajo se procedió a levantar un detallado modelo de elevación digital (MED), para ejecutar una evaluación hidrográfica basada en la topografía, que permitiera determinar el trazado de potenciales corredores de inundación que pudieran afectar el terreno municipal en análisis. El método seleccionado fue el Índice Topográfico de Humedad (ITH), (Carson & Kirkby, 1972), el cual modela la dinámica de los flujos superficiales y subsuperficiales basado en el control topográfico del escurrimiento (Alcántara-Ayala, 2000), ofreciendo de esta manera una mejor perspectiva en lo referente a la predicción de sitios que, por saturación y alta concentración del escurrimiento, puedan actuar como rutas iniciales a procesos mayores de inundación. Una mayor descripción del ITH se consigue en la sección 5 de este artículo.

2. Justificación

El aumento de la intensidad y frecuencia de las lluvias en el área metropolitana de Trujillo durante el período lluvioso del año 2008, desencadenó una serie de eventos fluvo torrenciales. Una consecuencia inmediata de estos eventos fue no solo el aumento del caudal del río Castán –dado el aumento del escurrimiento en su cuenca– sino el incremento de su poder erosivo, ilustrándose a lo largo de su lecho fluvial en el ensanchamiento del mismo y el arrastre de detritos de mediano tamaño.

Ya en abril del 2008, el Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana, pronosticaba, para el área correspondiente al estado Trujillo, una temporada lluviosa para ese año ‘muy fuerte’, siendo ésta la penúltima clase dentro de un rango de siete clases que van de seco a extremadamente fuerte (Velásquez, 2008). Igualmente Velásquez (2008a), en un reporte de trabajo, realiza un análisis de la distribución de frecuencia de las precipitaciones acumuladas en 24 horas, tomando datos diarios desde 1961 hasta el 2001; plantea que aunque en Venezuela cada vez son menos los días con lluvias, las mismas sin embargo, al presentarse lo hacen con mayor intensidad. Esto ya había sido advertido por García y Perdomo (2000), quienes atribuyen el aumento de los casos de inundaciones, particularmente en la zona norte costera, al incremento de estas lluvias extremas, a partir de la década de los 90 del pasado siglo XX.

El terreno municipal aledaño a la redoma El Prado, entre el río Castán y el eje vial Valera-Trujillo, también sufrió las consecuencias de estos eventos, los cuales se manifestaron en la inundación de detritos que afectó el área y que se ilustra en la figura 2 y anexo 1. Esta inundación momentánea se originó por:

- El aumento del caudal y de los detritos en el lecho del río Castán, que elevaron el nivel del río y propiciaron su explayamiento a las áreas inmediatas.
- El incremento de la socavación basal de los bancos del río Castán, luego del cruce con el puente vecino a la redoma

de El Prado, que permitieron brechas a la entrada de agua. En anteriores estudios (Ferrer, 1987), se describe la dinámica geomórfica del río Castán como subordinada a la conducta de los torrentes locales, hasta el punto de que la mayor actividad de este curso corresponde a procesos de excavación de aquellos depósitos acumulados por sus tributarios.

- El carácter fluvial del terreno en cuestión, desde el punto de vista geomorfológico, hace que esta área se corresponde al lecho de inundación eventual del río Castán, lo cual no impide su uso, siempre y cuando se realicen obras de contención al río y se propicie y mantenga el canal del mismo.

La necesidad de construir el Hospital del Seguro Social en el municipio Trujillo se sobrepone a la posibilidad de realizar

estudios de mayor costo/tiempo como análisis hidráulicos, por lo que este trabajo se limita al análisis de la topografía del sitio como factor determinante en la amenaza por inundación que potencialmente presenta.

3. Objetivo

El objetivo final de este trabajo es determinar la localización óptima del Hospital del Seguro Social del municipio Trujillo, estado Trujillo-Venezuela, mediante la zonificación de la amenaza por inundación de detritos en el área determinada a partir de los niveles de concentración del escurrimiento superficial, calculados principalmente por el índice topográfico de humedad (ITH), e información asociada, que luego es integrada a través de un análisis booleano estándar.

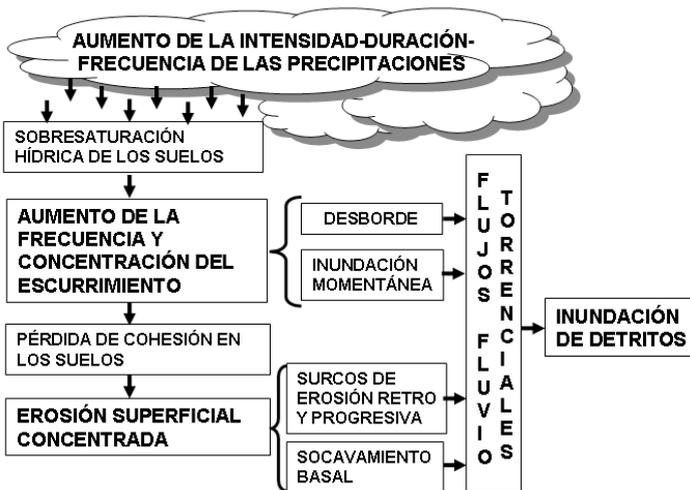


Figura 2. Eventos hidrográficos acontecidos en el área de estudio durante las lluvias extraordinarias del 2008

4. Área de estudio

El área de estudio (Figura 1), corresponde a un terreno municipal localizado en los terrenos bajos y planos del municipio Trujillo, entre el cauce del río Castán y el eje vial Trujillo-Valera. Este terreno se asienta en el valle de inundación del río, con un rango de altitudes entre 428 a 454 msnm, correspondiendo las altitudes mayores a 440 msnm a las zonas del terraplén del eje vial y el contacto de éste con las colinas circundantes en el sur del área. Según el explorador de Google Earth, las coordenadas centrales del área son: N9, 419535°, O70, 465543°.

El patrón de temperaturas regente en el área es de tipo megatérmico (media anual > 25°C), y el régimen de lluvias corresponde al bimodal, propio de la cuenca del lago de Maracaibo, con dos picos anuales (mayo y octubre) de precipitación. Según la estación meteorológica de Pampanito (estado Trujillo), la precipitación anual es de 1.386 mm (Corporación de los Andes, 2006). La vegetación se reduce a dos conjuntos, el bosque de galería conformado por bambú, arbustos y guamos, que acompaña al río Castán; y el herbazal / matorral que cubre el resto de la planicie. No existe un uso agrícola definido en estos terrenos. El área de estudio tiene 21,6 hectáreas y corresponde a una poligonal de 2.108,3 m de perímetro.

Geomorfológicamente estos terrenos son controlados por la dinámica fluvial del Castán, por lo que están conformados por sedimentos no consolidados que se depositan luego de los desbordes y expla-

yamientos provenientes del cauce. Esta dinámica se revela y al mismo tiempo se justifica dado las bajas pendientes las cuales no sobrepasan los 2°. Por ello, en esta sección, el Castán puede ser considerado como un río de fondo móvil, con una amplitud de cauce suficiente para generar llanuras aluviales o de desborde (Ferrer, 1988). Por su cercanía a la sección montañosa de la cuenca del Castán, estas unidades geomórficas son consideradas propensas a ser afectadas por inundaciones de detritos más que a procesos de inundación o flujo de detritos, según lo explicado por Wilford *et al.* (2004).

Tal como lo describe Wilford *et al.* (2004), una inundación de detritos presenta una concentración de sedimentos de 20 a 47% por volumen, con significativos depósitos fuera del cauce, debido a que la carga de sedimentos sobrepasa la capacidad de carga. Estos sedimentos se presentan como un conglomerado caótico, de baja imbricación y sin ninguna consolidación. Este tipo de sedimentación unido a la baja pendiente acentúa la presencia de una zona de saturación hídrica, lo cual se perfila como la antesala del proceso de inundación que limitaría la construcción de infraestructura sobre estos terrenos. Ya Ferrer (1988), en una evaluación de la aptitud urbanística de los terrenos situados entre Valera y Trujillo, determina seis niveles de estabilidad relativa y le asigna la categoría de áreas con nivel freático alto susceptibles a ser inundadas.

5. Índice Topográfico de Humedad (ITH)

Dada la importancia del ITH en este análisis, en esta sección se amplía la descripción y funcionamiento del mismo. Este índice está relacionado con la humedad edáfica y refleja la tendencia del suelo a la generación de escorrentías, debido a que los perfiles con mayor humedad son más proclives a saturarse, por lo que la precipitación caída sobre ellos puede convertirse mucho más fácilmente en escorrentía. Así, cuanto más elevado es el valor de este índice, mayor humedad debe presentar la celda en función de su configuración topográfica, la cual es extraída de un modelo de elevación digital (MED). Una de las grandes ventajas que ofrecen los MED es que contienen información totalmente distribuida, espacialmente continua y fácilmente transformable, de allí que la precisión y robustez del ITH depende de la exactitud y escala del MED utilizado para su generación.

La viabilidad de asociar procesos geomorfológicos con métodos como el ITH ha sido demostrada en diferentes trabajos como los descritos en el cuadro 1. Maneta y Schnabel (2003), plantea que la variabilidad espacial y temporal de la distribución de la humedad en el suelo es producto de una cantidad de factores que lo determinan y que se influyen mutuamente, pero agrega que autores como Beven & Kirkby (1979), Florinsky *et al.* (2002); Qiu *et al.* (2001) y Western *et al.* (1999), coinciden en considerar el relieve como el factor determinante de los patrones de humedad del suelo, dando

lugar al desarrollo de índices o métodos que ponen en relación las formas del terreno con propiedades del suelo. De allí que, el ITH sea un factor fundamental en el modelado de procesos geomórficos por contribuir a su cuantificación, considerando igualmente que el análisis cuantitativo de la geomorfología no solo describe las características topográficas sino revela también procesos geomorfológicos (Dong *et al.*, 2008).

El ITH combina la contribución al escurrimiento de un área local drenada y la pendiente de la misma, y es comúnmente usado para cuantificar el control topográfico sobre los procesos hidrológicos y está definido como (Sorensen *et al.*, 2005):

$$\ln\left(\frac{af}{\tan \beta}\right)$$

donde:

af = área local drenada para un punto de cálculo

$\tan \beta$ = Pendiente direccional de la celda de interés (y de las 8 vecinas en el caso de utilizar un algoritmo D(8))

Este modelo expresa parcialmente el volumen relativo y la cantidad de movimiento del flujo que pasará por cada punto del terreno. A mayor área drenada y menor pendiente se incrementa la concentración y saturación hídrica en los suelos, áreas con valores altos de ITH son zonas de concentración del escurrimiento (Alcántara-Ayala, 2000). Un ejemplo esquemático sobre el funcionamiento del ITH en la cuadrícula de un MED se describe en el anexo 2.

Cuadro 1. Resumen de algunas aplicaciones del ITH por área temática, tipo, procedimiento y autores

Área Temática	Tipo de Estudio	Procedimiento	Autores
ITH / Vegetación	Correlación diversidad de plantas vasculares, pH, niveles freáticos y humedad del suelo / índices topográficos de humedad	Construcción de diferentes índices topográficos de humedad bajo distintos algoritmos y correlación de éstos	Sorensen <i>et al.</i> , 2005
	Caracterización de la producción neta primaria	Cálculo de áreas potenciales de crecimiento vegetal basado en niveles del ITH	White & Running, 1994
	Patrones y distribución de la vegetación		Moore <i>et al.</i> , 1993; Zinko <i>et al.</i> , 2005
	Localización de sitio potenciales para plantaciones de bosques	Cálculo de la humedad del suelo basado en niveles del ITH	Holmgren, 1994
ITH / Erosión	Evaluación y monitoreo de modelos de erosión y sedimentación	Comparación de índices para el cálculo de humedad y flujos hídricos como también ITH	Saavedra & Mannaerts, 2003
ITH / Suelos	Distribución espacial de la humedad del suelo	Aplicación del ITH bajo redes neuronales artificiales	Maneta & Schnabel, 2003
	Variación de la humedad edáfica y topografía	Cálculo comparativo del ITH y humedad edáfica en una cuenca	Qiu <i>et al.</i> , 2001
	Predicción de las propiedades del suelo a partir de MED	Cálculo del ITH y su asociación con otras propiedades del suelo	Florinsky <i>et al.</i> , 2002
	Distribución de la humedad edáfica y relación con índices topográficos	Cálculo del ITH y su asociación con la humedad edáfica	Western <i>et al.</i> , 1999
ITH / Hidrología	Escalas y su impacto en procesos hidrológicos	Cálculo y comparación de ITH a diferentes escalas espaciales sobre una misma área	Beven <i>et al.</i> , 1988; Famiglietti & Wood, 1991; Sivapalan & Wood, 1987; 1990
	Modelamiento físico-hidrológico en cuencas	Introducción del ITH	Beven & Kirkby, 1979
ITH / Modelamiento	Identificación del trazado de flujos hídricos para modelado geoquímico	Trazado del escurrimiento superficial a partir del cálculo de ITH	Robson <i>et al.</i> , 1992
	Extracción/digitalización de estructuras topográficas	Aplicación de filtros lineares para la determinación de flujos en una cuadrícula SIG. Ejemplos con el ITH	Jenson & Domingue, 1988 Holmgren, 1994a
	Determinación del escurrimiento superficial en vertientes a partir de MED	Aplicación de ITH a partir de MED de una misma cuenca pero elaborados a diferentes escalas	Quinn <i>et al.</i> , 1991
ITH / Deslizamientos	Determinación de la susceptibilidad a movimientos de masa	Asociación del ITH a vertientes susceptibles a deslizamientos	Alcántara-Ayala, 2000

6. Metodología

En este trabajo, la localización óptima del Hospital del Seguro social del municipio Trujillo viene dada, en principio, por la zonificación de la amenaza por procesos de inundación en el terreno y, luego, por la integración de ésta y otros productos derivados del ITH, en un modelo booleano de conjunción estándar. La zonificación de la amenaza por inundación de detritos en el área se determinó a partir de los niveles de saturación hídrica superficial, basada en el cálculo del índice topográfico de humedad (ITH) dentro de un ambiente SIG (Sistema de Información Geográfica), capaz de describir el flujo y concentración del agua de escurrimiento a partir de esquemas y algoritmos de acumulación y tránsito. Es por lo tanto un estudio exploratorio restringido al análisis topográfico. La pieza clave de este análisis es el MED, el cual se produce a partir de la digitalización de un mapa topográfico del área realizado para la Alcaldía de Trujillo, escala 1:1.000 (Alcaldía de Trujillo, 2005), al que se adicionan puntos de control obtenidos con un sistema de posicionamiento global GPSMAP 60CSx de Garmin. La resolución espacial de la celda fue ajustada a 1m².

De este MED se derivan capas espaciales de entrada como pendientes, tangente de la pendiente, dirección y acumulación de flujos, usando el descenso más inclinado o algoritmo D8 (Jenson & Domíngue, 1988), y combinada en un modelo de cuadrícula mediante el SIG ILWIS 3.5 (52° North, 2009), de libre adquisición en la red. Tal como se describe

en la figura 3, el análisis topográfico se desarrolla mediante:

- Cálculo de la acumulación del escurrimiento superficial, el cual se basa en un conteo acumulativo de las unidades de áreas que drena hacia una dirección (dirección del flujo (α)) y sitio común (acumulación del flujo (αf)), permitiendo definir el patrón de drenaje y su intensidad potencial.
- Cálculo del índice topográfico de humedad ITH (Wetness topographic index), (Beven & Kirkby, 1979), el cual se expresa como el logaritmo neperiano del producto del anterior índice de escurrimiento superficial, y de la dirección de la pendiente del área ($\tan(\beta)$). Este índice provee una idea sobre la distribución y origen del escurrimiento superficial y de las zonas potenciales de saturación.
- Del cálculo de los índices arriba señalados y mediante una clasificación no supervisada del ITH, basada en la segmentación del histograma de frecuencia de la imagen según la curva acumulada de los valores ITH, se obtiene un producto terminal llamado 'Concentración del escurrimiento', el cual establece en términos relativos (baja, moderada, alta y muy alta), la magnitud de la concentración del escurrimiento para el terreno analizado.

Una concentración de escurrimiento catalogada como 'alta' corresponde a superficies en el terreno analizado donde, debido a su muy baja pendiente, recibe el escurrimiento de su área inmediata,

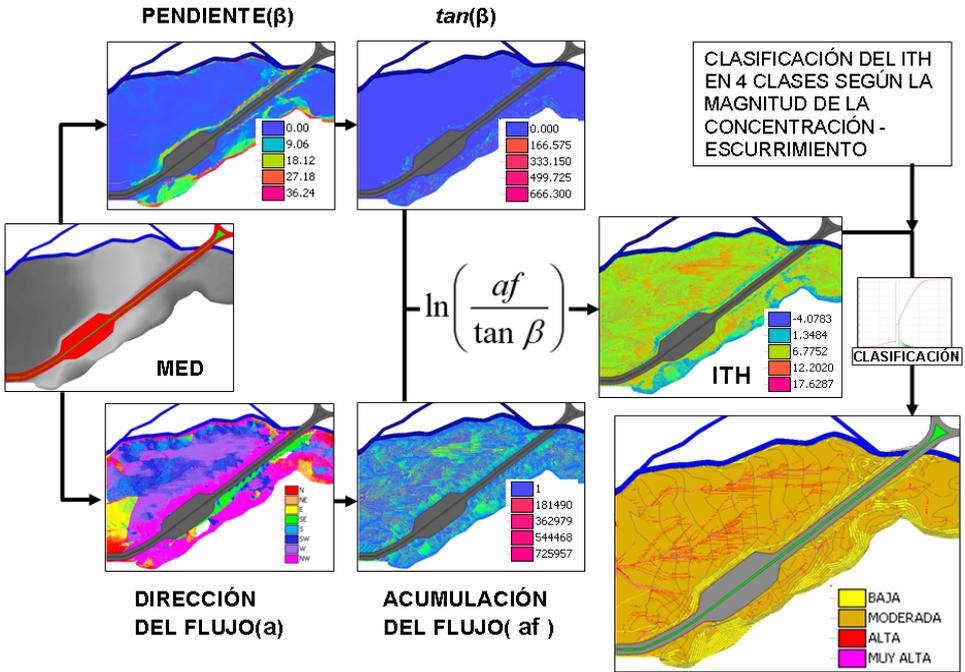


Figura 3. Análisis topográfico para el cálculo del ITH y su posterior clasificación en clases relativas a la magnitud de la concentración del escurrimiento

generando una saturación del suelo y propiciando la formación de surcos de escorrentía. En el mismo sentido, una concentración de escurrimiento ‘muy alta’ corresponde a las superficies más bajas, casi planas del terreno analizado, y cuya proclividad a concentrar el escurrimiento superficial las presenta como áreas inundables. Estas clases de concentración de escurrimiento no son necesariamente areales y pueden presentarse como patrones lineares en la superficie analizada, tal como se ilustra en la figura 4.

La capacidad del ITH para revelar no solo las áreas de concentración del escurrimiento sino también sus áreas de divergencia, permite entonces a través de

su análisis e interpretación heurística, la zonificación geomorfológica del área de estudio en tres zonas dinámicas: Zona de escurrimiento difuso, zona de escurrimiento concentrado y lecho potencial de inundación (Figura 5). Estas zonas reflejan en primera instancia los niveles de amenaza por inundación de detritos, estableciéndose como el área de menor amenaza la zona de escurrimiento difuso. Sin embargo, dado que el objetivo final de este trabajo es la determinación de la localización óptima del Hospital del Seguro Social, una serie de productos derivados del ITH y relativos a la localización del hospital son integrados en un modelo booleano.

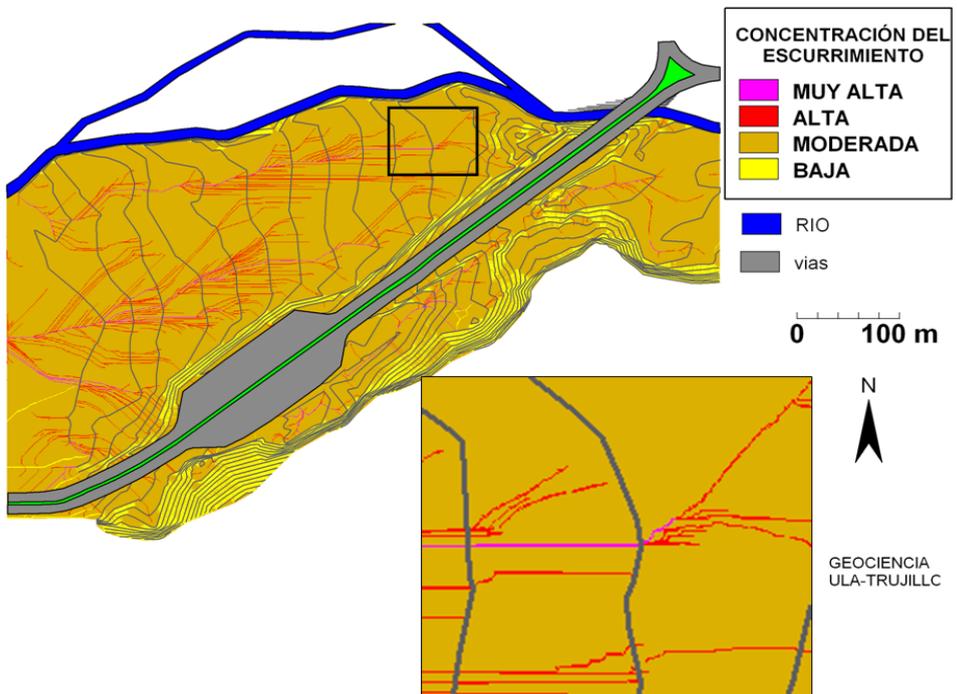


Figura 4. Clasificación derivada del ITH, de la concentración del escurrimiento en términos de magnitud relativa. En recuadro detalle del carácter lineal de las clases muy alta y alta

7. Integración de la información

Los modelos de localización operan a través de dos criterios que optimizar, el primero requiere que la actividad se localice lejos de externalidades negativas, mientras que el segundo, demanda que la actividad se ubique suficientemente cerca para lograr algún tipo de eficiencia operativa (Medina & Cerda, 2008). En nuestro caso, el hospital debe localizarse lejos de las áreas determinadas mediante el ITH como de alta y muy alta amenaza por inundación y cerca del eje vial Valera-Trujillo, por requerimiento de accesibilidad. En este sentido, el sitio para

construir el hospital debe satisfacer los siguientes requerimientos:

- Debe estar a más de 15 m de distancia de los patrones lineales de muy alta concentración del escurrimiento.
- Debe estar a más de 10 m de distancia de los patrones lineales de alta concentración del escurrimiento.
- Debe estar fuera de las clases de alta y muy alta concentración del escurrimiento.
- Debe estar fuera de las zonas geomorfológicas de lecho de inundación y escurrimiento concentrado.
- Debe estar dentro de una distancia de 50 m del eje vial Valera-Trujillo.

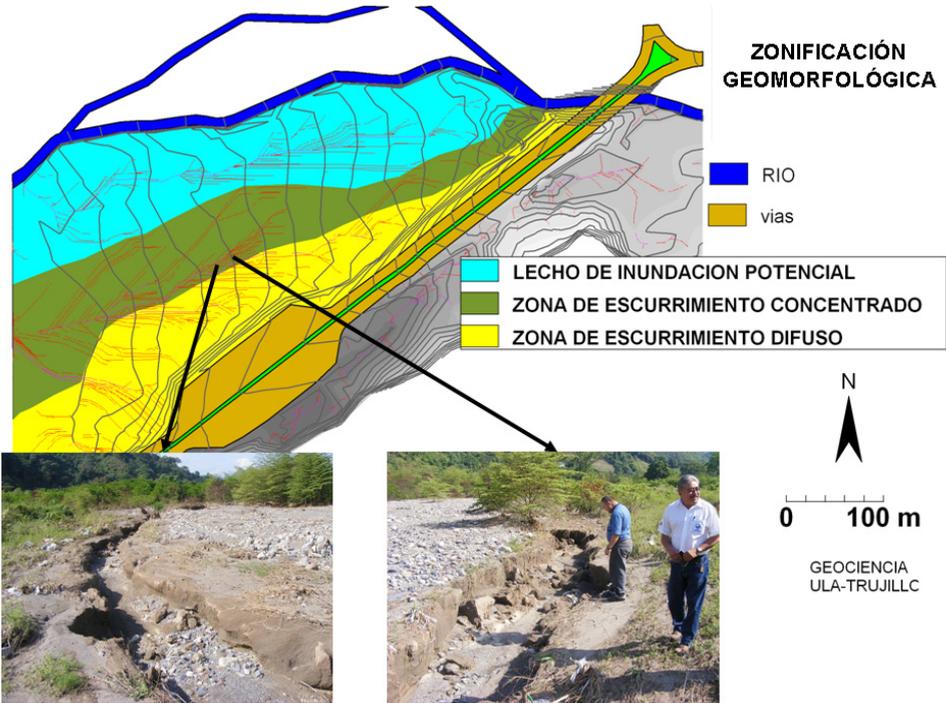


Figura 5. Zonificación geomorfológica del área de estudio basada en el análisis e interpretación empírica del ITH

- El terreno debe tener al menos 1.000 m² continuos.

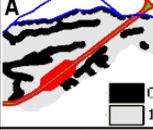
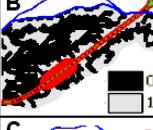
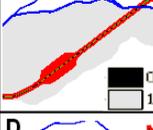
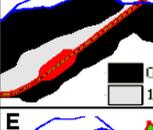
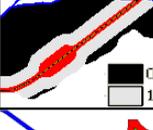
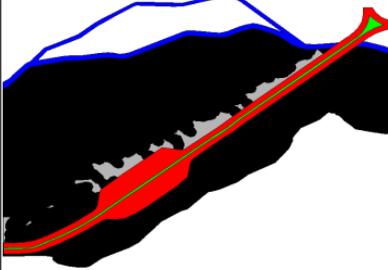
Dado el carácter condicionante de los requerimientos, en este trabajo se propone un modelo booleano para la integración final de las diferentes capas espaciales generadas mayormente a partir del ITH. Este modelo, descrito e ilustrado en el cuadro 2, consiste en dos pasos:

- La reclasificación de los mapas generados a partir del ITH y del mapa base en términos binarios de apto (1) o no apto (0), según los requerimientos de localización del hospital del seguro social.

- La integración de los productos reclasificados en un mapa final utilizando el operador de conjunción lógica AND, el cual establece un valor verdadero (*true*) si todos los valores de los mapas combinados son verdaderos o apto (1), y falso (*false*) o no apto (0), si no se cumple esta condición.

Para mayor información sobre el uso práctico del modelo booleano con datos espaciales puede consultarse en Bonham-Carter (1994), mientras que una introducción teórica de su utilización es ofrecida por Robinove (1989).

Cuadro 2. Métodos, productos y criterios utilizados para la generación de mapas booleanos (binarios) e integración en un mapa final que señala los sitios aptos para la construcción del hospital

FUENTES	MÉTODOS	PRODUCTOS	CRITERIOS PARA RECLASIFICACIÓN BINARIA		MAPAS BINARIOS GENERADOS
Índice Topográfico de Humedad (ITH)	Extracción de los patrones lineares de <i>muy alta</i> y <i>alta</i> concentración.	Distancia a <i>muy alta</i> concentración del escurrimiento	Distancia < 15m Distancia > 15m	= 0 = 1	
	Cálculo de cinturones de distancia	Distancia a <i>alta</i> concentración del escurrimiento	Distancia < 10m Distancia > 10m	= 0 = 1	
	Clasificación basada en histograma de frecuencias	Concentración del escurrimiento en cuatro clases.	•Baja •Moderada •Alta •Muy alta	= 1 = 1 = 0 = 0	
ITH + acumulación de flujo (a) + pendientes (b)	Clasificación mediante Interpretación heurística	Zonificación dinámica geomorfológica	•Ecurrimiento difuso •Ecurrimiento concentrado •Lecho de inundación	= 1 = 0 = 0	
Mapa base	Cálculo de cinturones de distancia	Distancia a vías	Distancia < 50m Distancia > 50m	= 1 = 0	
Localización del sitio para el hospital dado por MAPA FINAL = A AND B AND C AND D AND E					

8. Conclusiones

En este trabajo, la localización óptima para la construcción del Hospital del Seguro Social del municipio Trujillo se determinó tomando en consideración dos

grandes condicionantes: la primera referida a la disponibilidad de terrenos municipales, la cual, para la fecha de la elaboración de este análisis, se limitaba al área comprendida entre el río Castán y el eje vial Valera-Trujillo. La segunda con-

dicionante es la susceptibilidad a inundación por detritos a que están sujetos estos terrenos. Se planteó entonces el desarrollo de un análisis de amenaza por inundación, por desborde fluvial, que sugiriese cuáles terrenos en el área mencionada, podrían albergar esta infraestructura con un mínimo relativo de vulnerabilidad a inundaciones. Dado el grado de detalle de este trabajo, la zonificación de la amenaza por inundación de detritos fue determinada a partir de los niveles de concentración del escurrimiento superficial, calculados principalmente por el índice topográfico de humedad (ITH), tal como se ilustra en las figuras 3, 4 y 5. La robustez del ITH y la manipulación de esta información bajo un ambiente de SIG, permitió, igualmente, la derivación de nuevas capas de información espacial, asociadas a la susceptibilidad a inundaciones tales como la traza de los patrones de 'muy alta' y 'alta' concentración del escurrimiento, de los cuales se establece cinturones de distancia que se ajusten a los requerimientos discretos de localización presentados en la sección 7 de este trabajo. En el mismo sentido, requerimientos de accesibilidad y dimensiones del terreno a seleccionar fueron determinados bajo ambiente SIG. La integración de estas nuevas capas de información se ejecutó a través de un análisis booleano estándar, el cual permite un modelado integral que cumpla con los dos principales objetivos de todo modelo de localización, como es la prevención de las externalidades negativas y el aprovechamiento de las internalidades beneficiosas de los factores determinantes. Una amplia ilustra-

ción de este proceso es descrito en cuadro 2. Finalmente, la figura 6 presenta las 10 áreas consideradas potencialmente aptas para la localización del nuevo hospital, de las cuales y tomando en cuenta la dimensión areal de éstas (Cuadro 3), sólo las áreas 1, 3 y 5 cumplen con el total de los requerimientos. Todas estas áreas se ubican adyacentes y en paralelo al eje vial Valera-Trujillo, terrenos los cuales corresponden a los laterales del relleno construido para la cimentación de dicho eje y que se erige como las zonas más altas del área analizada.

Cuadro 3. Superficie de las áreas seleccionadas por el método booleano y su aptitud final para la construcción del hospital, según la superficie continua $\geq 1.000\text{m}^2$

Áreas	m ²	Aptitud
Área 1	1.800,10	Apto
Área 2	89,86	No Apto
Área 3	2.148,25	Apto
Área 4	458,58	No Apto
Área 5	1.866,93	Apto
Área 6	393,90	No Apto
Área 7	27,23	No Apto
Área 8	241,07	No Apto
Área 9	30,78	No Apto
Área 10	0,11	No Apto

Si bien este análisis se considera en términos generales un estudio exploratorio restringido al análisis topográfico, los resultados aquí obtenidos permiten ampliar y orientar el conocimiento del área analizada hacia objetivos concretos como la localización de infraestructura. Esta información indudablemente puede servir de punto de partida para la formu-

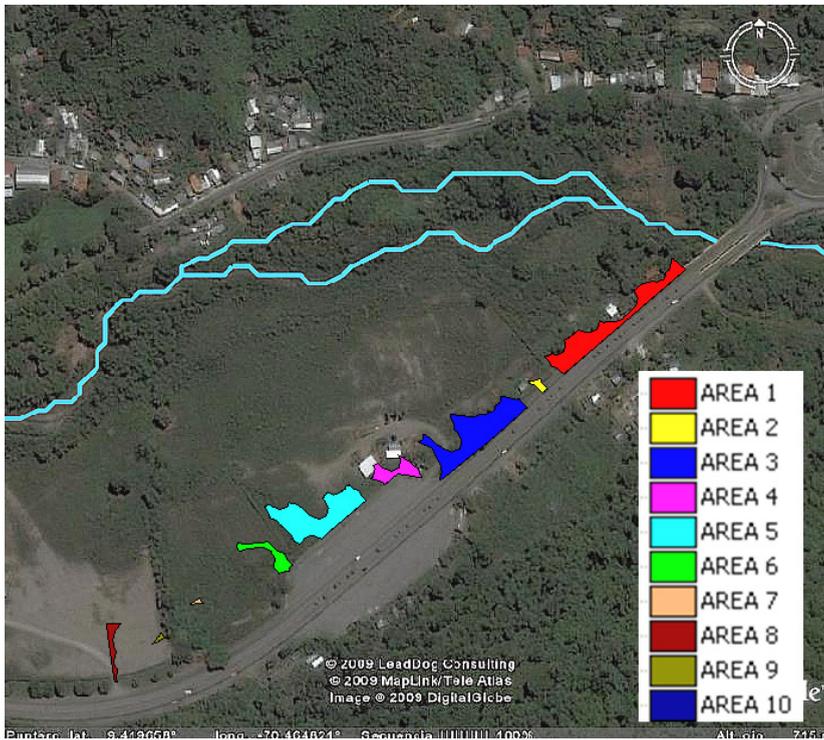


Figura 6. Áreas potencialmente aptas para la construcción del hospital según el análisis booleano descrito en cuadro 2. Sin embargo, dado que el terreno debe tener al menos 1000m² continuos, las áreas que cumplen este requerimiento final son: Área 1, área 3 y área 5 (Cuadro 3). La imagen de fondo es cortesía de Google Earth (última consulta 12-05-2009)

lación de obras de ingeniería tales como la construcción de diques que corrijan la susceptibilidad a inundaciones presente en el área.

9. Referencias citadas

ALCALDÍA DE TRUJILLO. 2005. *Proyecto de urbanismo El Prado, planta topográfica original, plano 01. Sector El Prado, Parroquia Tres Esquinas, Municipio Trujillo*. (Inédito).

ALCÁNTARA-AYALA, I. 2000. *Índice de susceptibilidad a movimientos del terreno y*

su aplicación en una región semiárida. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 17 (1): 66-75. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.

BEVEN, K. J.; WOOD, E. F. & M. SIVAPALAN. 1988. *On hydrological heterogeneity-catchment morphology and catchment response. Journal of Hydrology*. 100, 353-375.

BEVEN, K. J. & M. J. KIRKBY. 1979. *A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Science Bulletin*. 24(1): 43-69.

BONHAM-CARTER, G. F. 1994. Geographic information systems for geoscientists: Mo-

- delling with GIS. En: **Computer Methods in the Geosciences**, volume 13. 398 p.
- CARSON, M. A. & KIRKBY, M. J. 1972. **Hillslope form and processes**. Cambridge, Univer. Press, Oxford.
- CORPORACIÓN DE LOS ANDES. 2006. *Dossier Municipal 2006-Pampanito*. [On line] http://www.corpoandes.gov.ve/files/imagenes/file/descargas/gerencia_informacion/dossiers/dosier%20corregido%20definitivo%202006/Dossier%20Trujillo%20PDF/dossier%20municipal%202006/Dossier%20Pampanito%202006.pdf, [última consulta: 21-03-2009].
- DONG YOUFUA, TANG GUONA & TINGA ZHANG. 2008. A Systematic classification research of topographic descriptive attribute in digital terrain analysis. *Proceedings of the XXI congress of the International society for photogrammetry and remote sensing*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B2. Beijing July 3-11, 2008. [On line] http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/2_pdf/2_WG-II-2/34.pdf, [última consulta: marzo 2009].
- FAMIGLIETTI, J. S. & E. F. WOOD. 1991. *Evapotranspiration and runoff from large land areas-land surface hydrology for atmospheric general-circulation models*. **Surveys in Geophysics**. 12: 179-204.
- FERRER, C. 1987. *Influencia de las condiciones geomorfológicas en el desarrollo y expansión de la ciudad de Trujillo*. **Revista Geográfica Venezolana**, (28): 93-136.
- FERRER, C. 1988. *Conurbación Valera-Trujillo. Una metodología para la evaluación geomorfológica de la estabilidad relativa de sus terrenos*. **Revista Geográfica Venezolana**. (29): 5-64.
- FLORINSKY, I.V.; EILERS, R.G.; MANNING, G. R. & L.G. FULLER. 2002. *Prediction of Soil Properties by Digital Terrain Modelling*. **Journal of Environmental Modelling & Software**. 17: 295-311.
- GARCÍA, L. y E. PERDOMO. 2000. *Situación Meteorológica de las inundaciones y flujo de lodo en el norcentro de Venezuela, con especial énfasis en la costa norte. (16 de diciembre de 1999)*. ARMADA, CONICIT, CVG-EDELCA, FONAIAP, MARN, SEMETFAV, UCV Y VENEHMET. Caracas-Venezuela (Informe no publicado, CVG-EDELCA).
- GOOGLE EARTH. [On line] <http://earth.google.com>, [última consulta: 10-03-2009].
- HOLMGREN, P. 1994. *Topographic and geochemical influence on the forest site quality, with respect to Pinus sylvestris and Picea abies in Sweden*. **Scandinavian Journal of Forest Research**. 9, 75-82.
- HOLMGREN, P. 1994a. Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation. **Hydrological Processes**, 8, 327-334.
- JENSON, S. K. & J. O. DOMINGUE. 1988. *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system análisis*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. 54(11), 1593-1600.
- MANETA, M. & S. SCHNABEL. 2003. Aplicación de redes neuronales artificiales para determinar la distribución espacial de la humedad del suelo en una pequeña cuenca de drenaje. Estudios preliminares. En: J. Álvarez-Benedí y P. Marinero (ed). **Estudios de la zona no saturada del suelo** Vol. VI., 295-304. [On line] <http://www.zonanosaturada.com/publics/V6/p295-304.pdf>, [última consulta: 21-03-2009].

- MEDINA, M. & J. CERDA. 2008. *Modelo de localización óptima de actividades no de-seadas aplicado a los residuos sólidos en la región metropolitana*. **Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería**, (1), 16, 211-219, [On line] http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052008000100011&lng=es&nrm=iso, [última consulta: 1-05-2009].
- MOORE, I. D.; NORTON, T. W. & J. E. Williams. 1993. *Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes*. **Journal of Hydrology**. 150, 717-747.
- QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P. & O. PLANCHÓN. 1991. *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrains models*. **Hydrological Processes**. 5, 59-79
- QIU, Y.; FU, B.; WANG, J. & L. CHEN. 2001. *Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China*. **Journal of Hydrology**. 240(3-4): 243-263.
- SAAVEDRA, C. & C. MANNAERTS. 2003. Evaluación y monitoreo de modelos de erosión y sedimentación a escala regional usando sensores remotos y SIG. Caso de estudio en la región andina, Cochabamba-Bolivia, Archivos de la 3^a Conferencia Latinoamericana sobre Manejo de cuencas: "Desarrollo Sostenible en Cuencas", Junio, 13-09. Arequipa-Perú.
- SIVAPALAN, M. & E. F. WOOD. 1987. *A multidimensional model of nonstationary space-time rainfall 5at the catchment scale*. **Water Resources Research**. 23, 1289-1299.
- SIVAPALAN, M.; WOOD, E. F. & K. J. BEVEN. 1990. *On hydrologic similarity. A dimensionless flood frequency model using a generalized geomorphologic unit hydrograph and partial area runoff generation*. **Water Resources Research**. 26, 43-58.
- SORENSEN, R.; ZINKO, U. & J. SEIBERT. 2005. *On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations*. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**. 2, 1807-1834, [On line] www.copernicus.org/EGU/hess/hessd/2/1807/
- ROBINOVE, C. J. 1989. Principles of Logic and the Use of Digital Geographic Information Systems. En: Ripple, W. J. (ed). **Fundamentals of geographic information systems: a compendium**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 61-80.
- ROBSON, A., BEVEN, K., & C. NEAL. 1992. *Towards identifying sources of subsurface flow: a comparison of components identified by a physically based runoff model and those determined by chemical mixing techniques*. **Hydrological Processes**. 6, 199-214.
- VELÁSQUEZ, R. 2008. *Tendencias pluviométricas, invierno 2008*. Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana. [On line] http://www.meteorologia.mil.ve/siafavm/frontend/static_files/investigaciones/inv_down.php?url=TEMPORADA_DE_LLUVIA_2008.pdf, [última consulta: 12-02-2009].
- VELÁSQUEZ, R. 2008a. *Evidencias de variabilidad y cambio climático en Venezuela*. Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana. [On line] http://www.meteorologia.mil.ve/siafavm/frontend/static_files/investigaciones/inv_down.php?url=cambio_climatico_Venezuela.pdf, [última consulta: 12-02-2009].
- WESTERN, A.W., GRAYSON, R.B., BLOSCHL, G., WILLGOOSE, G.R. & T.A McMAHON.

1999. *Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices.*

Water resources research, 35: 797-810.

WHITE, J. D. & S.W. RUNNING. 1994. *Testing scale-dependent assumptions in regional ecosystem simulations.* **Journal of Vegetation Science**, 5, 687-702.

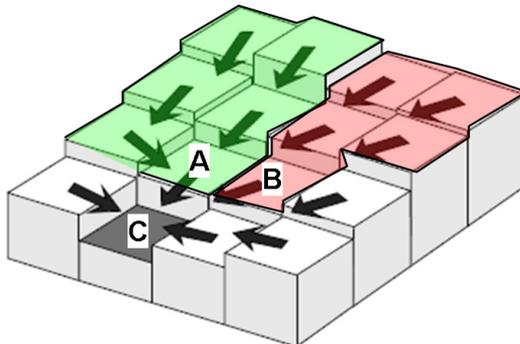
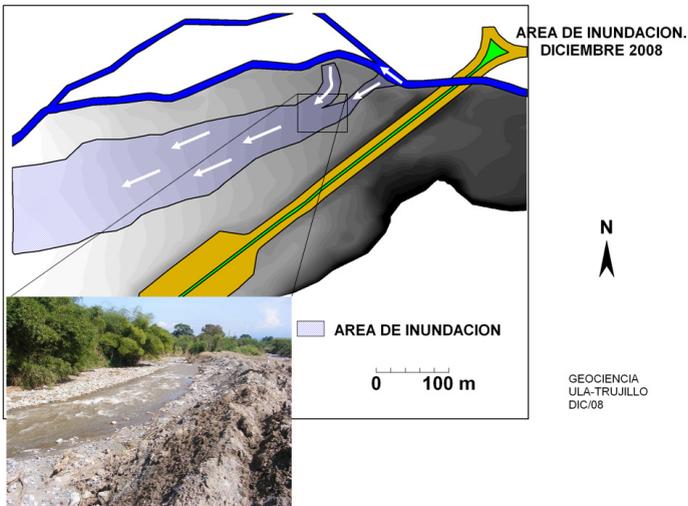
WILFORD, D. J.; SAKALS, M. E.; INNES J. L.; SIDLE, R. C. & W. A. BERGERUD. 2004. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics.

En: **Landslides**, 1: 61-66, DOI 10.1007/s10346-003-0002-0, Springer-Verlag.

ZINKO, U.; SEIBERT, J.; DYNESIUS, M. & C. NILSSON. 2005. *Plant species numbers predicted by a topography based groundwater-flow index.* **Ecosystems**, 8, 430-441.

52°NORTH, *ILWIS*3.5. [Online] http://52north.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=33&Itemid=67 [última consulta: 12-03-2009].

Anexo 1. Área de inundación de detritos ocurrida en diciembre 2008



Anexo 2. Ejemplo esquemático del funcionamiento de ITH según el área y pendiente configurados de un MED. Dada la expresión $ITH = \ln(qf / \tan \beta)$

$ITH(A) =$	ln (área local drenada hasta el punto A (verde)/pendiente local direccional de las celdas de interés hasta el punto A (vector)).
$ITH(B) =$	ln (área local drenada hasta el punto B (rojo)/pendiente local direccional de las celdas de interés hasta el punto B (vector))
$ITH(C) =$	$ITH(A)+ITH(B)+$ ln (área local drenada hasta el punto C (blanco)/pendiente local direccional de las celdas de interés hasta el punto C (vector))