

APLICACIÓN DE LOS SIG PARA LA GENERACIÓN DE RUTAS DE EVACUACIÓN EN CASO DE DESASTRES, COMO AYUDA PARA LA PLANIFICACIÓN URBANA: “CASO COSTA ORIENTAL DEL LAGO DE MARACAIBO”

VÍCTOR H. CANO P.

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas –FUNVISIS–
vcano@funvisis.gob.ve

Recibido: octubre de 20

Recibido en forma final revisado: julio de 2009

RESUMEN

El trabajo consiste en la evaluación de rutas de evacuación en áreas afectadas por el fenómeno de subsidencia de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo –COLM–, en caso de una eventual ruptura del dique costanero a causa de una sacudida sísmica, utilizando como herramienta los sistemas de información geográfica –SIG–. La zona de estudio se encuentra por debajo del nivel medio del mar, su punto más deprimido es de -4,5 m para el año 1996, por lo cual, ante una ruptura del dique que contiene las aguas del mencionado lago, esta zona sería anegada, razón que amerita de la creación de rutas efectivas para evacuar a la población hacia las áreas seguras en el menor tiempo posible. En el presente, la COLM tiene un plan de contingencia en caso de la ruptura del dique, pero este plan no cuenta con el soporte de rutas de evacuación definidas, aspecto que es necesario para conocer cuál es el camino más corto entre las zonas afectadas y los centros de refugio, además de integrarse con una planificación urbana adecuada para garantizar la permanencia de estas rutas durante el desarrollo urbano. Para la creación de las rutas se generó un SIG en formato raster del área de estudio, el cual se apoyó en la ponderación de valores de velocidad de movimiento según el uso de la tierra, y se encontraron las rutas donde la velocidad fuera máxima, con lo que se garantiza que sea la ruta que consuma el menor tiempo para evacuar.

Palabras clave: SIG, Subsidencia, COLM, Planificación urbana, Prevención.

APPLICATION IN GIS FOR THE GENERATION OF EVACUATION ROUTES, TOOLS FOR URBAN PLANNING: “CASE: EAST COAST OF MARACAIBO LAKE”

ABSTRACT

This work aims at preparing evacuation routes in the areas affected by subsidence in the east coast of Lake Maracaibo, in case of rupture of the coastal protection dike by a seismic shock, using a geographic information systems –GIS–. The study area is below mean sea level, being its lowest part at -4.5 m as to 1996 year. So an eventual breach of the protecting dam would flood this depressed area, thus requiring the creation of the most effective routes to evacuate people to refuge areas in the shortest time possible. At present, a contingency plan for the area exists in case of dam breaching, but it does not have evacuation routes defined, to move people between affected areas and refuge centers in the most efficient manner. These route needs to be integrated in the urban planning in order to ensure their preservation through time during urban development. For the creation of the fastest and shortest evacuation routes, a GIS raster format of the study area was generated, which was based on the weighted values of speed of movement according to land use.

Keywords: GIS, Subsidence, East Coast of Maracaibo Lake, Urban planning, Prevention.

INTRODUCCIÓN

La Costa Oriental del Lago de Maracaibo –COLM– ha sido una zona de extracción petrolera por más de 80 años en Venezuela. Actualmente se extrae el 35% de la producción

de crudo del país (INE, 2009). Producto de la extracción intensa de petróleo, las arenas reservorio donde el hidrocarburo se encuentra se han compactado, dando origen al fenómeno de subsidencia (Nuñez *et al.* 1975 y Hennerberg *et al.* 1980). Este fenómeno afecta a dos municipios del estado

Zulia donde viven alrededor de 232.636 personas según el censo de 2001 (INE, 2009).

La más importante manifestación en la superficie de la subsidencia, es el cambio de relieve en el terreno, lo cual ha dado origen a numerosos eventos adversos. El más significativo ha sido el cambio gradual de la línea de costa (Febres, 1990), por lo cual se realizó la construcción de un sistema de diques con el objetivo de impedir que las aguas del Lago de Maracaibo inunden las zonas pobladas de Tía Juana, Ciudad Ojeda, Lagunillas y Bachaquero. La construcción del sistema de diques comenzó a finales de la década de 1920 y aún continúa a medida de que la subsidencia avanza. De acuerdo a Sully & Murria (1996), la diferencia entre la superficie del lago y el terreno es más de 4,5 metros en el punto más deprimido (Figura 1).

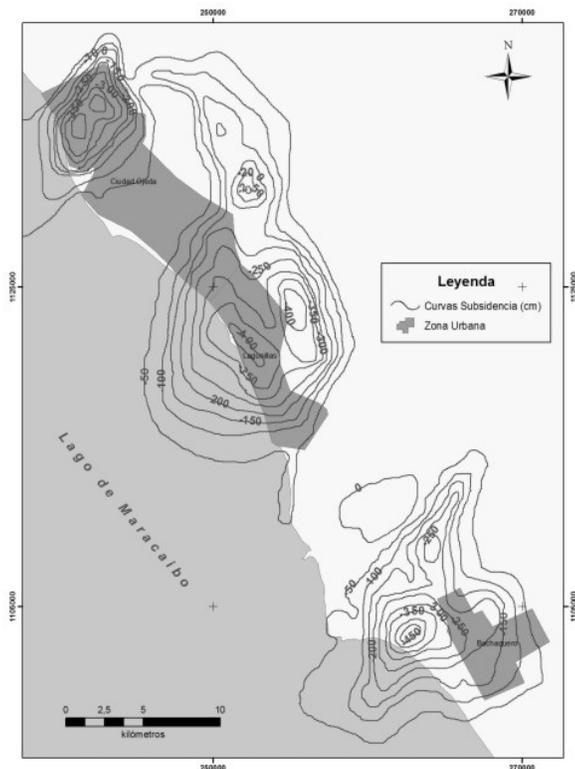


Figura 1. Mapa de subsidencia de la Costa oriental del Lago de Maracaibo (Modificado de Sully & Murria, 1996).

Debido a que los diques se han construido en diferentes períodos de tiempo (a medida que avanza la subsidencia en área), estos presentan diferentes métodos constructivos, lo cual puede generar áreas donde el dique sea más vulnerable a una ruptura respecto a otras (Maraven, 1992). Aunado a que la zona se encuentra en un área sísmica catalogada como zona 3 según la norma COVENIN 1756:2001, lo que se traduce en aceleraciones probables del suelo de 0.2g (20% de la gravedad), lo cual pone en riesgo la estructura del dique ante un movimiento sísmico de considerada magnitud. Por lo expresado anteriormente, la zona de la COLM

se encuentra bajo amenaza de una inundación repentina de las áreas afectadas por la subsidencia, por la eventual ruptura del dique costanero, siendo necesaria la creación de planes de contingencia para la zona, con rutas de evacuación hacia zonas seguras.

La zona de estudio cuenta con un plan de contingencia creado por la empresa Petróleos de Venezuela (MARAVEN, 1992), por decreto presidencial No. 908 de fecha 24 de mayo de 1990. Este decreto establece una comisión presidencial permanente para la elaboración y ejecución del plan de contingencia contra riesgos de inundación en la COLM con sede en Ciudad Ojeda, estado Zulia. Esta comisión estuvo integrada por representantes de varios ministerios y de las compañías petroleras que operaban en la zona, y elaboró un plan de contingencia, el cual establece las zonas más amenazadas por una eventual ruptura del dique costanero, los sitios de refugios que se deben disponer y todas las acciones que se deben realizar ante la ocurrencia de un potencial del desastre. Este plan de contingencia tiene una debilidad, no presentar rutas de evacuación definidas para cada estructura presente en la zona, en caso de ser necesario el desalojo de las áreas afectadas por la subsidencia.

El objetivo del presente trabajo es la propuesta de rutas de evacuación de las áreas afectadas por subsidencia en la COLM hacia sitios seguros, en caso de la ruptura del dique costanero, utilizando las herramientas de los sistemas de información geográfica –SIG–, lo cual implica la actualización de la base cartográfica (vías, uso del suelo, entre otros) de la zona afectada por la subsidencia por medio de la interpretación visual de elementos desde imágenes SPOT 5, así como de la estimación del tiempo de evacuación en caso de ruptura del dique costanero y el planteamiento de refugios para recepción de las personas evacuadas.

La creación de las rutas de evacuación para las zonas afectadas por subsidencias presentadas, tiene varios parámetros que reducen la precisión de las mismas, entre los cuales se deben mencionar:

- Poco tiempo para realizar una investigación detallada en campo sobre la factibilidad de la ruta de evacuación y/o la elaboración de simulacros que validen las rutas.
- La carencia de mapas actualizados de las zonas de subsidencia, tanto topográficos como de la subsidencia.
- El trabajo de investigación sólo toma en consideración la evacuación de las zonas en forma pedestre y no toma en cuenta el tiempo de evacuación dentro de las edificaciones elevadas (ejemplo: edificios de oficinas).
- La investigación no considera el número exacto de per-

sonas que habitan por manzana, ni el tipo y edad de la población, por lo cual se limita a suponer la misma capacidad de movimiento para todos los residentes de las áreas que se van a evacuar.

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en la COLM en el estado Zulia, Venezuela, y está compartida entre los municipios Simón Bolívar y Lagunillas. Las poblaciones afectadas por la subsidencia y estudiadas para la creación de las rutas de evacuación son Tía Juana, Ciudad Ojeda, Lagunillas y Bachaquero (Figura 2). Las coordenadas UTM Huso 19 del área de estudio son, E: 260.540; N: 1.141.258 y E: 235.620; N: 1.109.730.

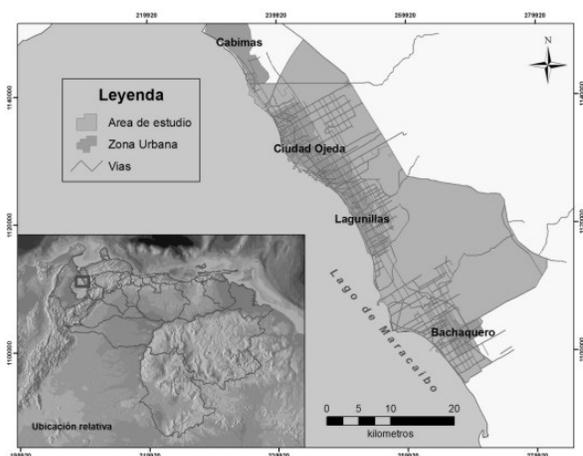


Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio.

Los principales drenajes naturales de la zona son los ríos Tamare y Pueblo Viejo. Además de gran cantidad de canales construidos, porque se debe desviar a la escorrentía del área de subsidencia. Sumado a esto se encuentran algunas ciénagas (pantanos) en la zona de influencia del Lago de Maracaibo.

La geomorfología del área de estudio, se caracteriza por ser una transición entre relieve de pie de monte al este y a medida que se acerca al Lago de Maracaibo (oeste), predominan ambientes de zona litoral. Toda la zona está cubierta por sedimentos del Cuaternario, disponiéndose los más antiguos hacia el este y los más recientes hacia el oeste. La zona de litoral presenta varios estuarios donde los sedimentos son poco consolidados, y el área es propensa a inundaciones en temporada de lluvia.

METODOLOGÍA

Para la creación de la mejor ruta de evacuación, siempre se busca el camino más rápido entre un punto de partida y un punto de llegada. El camino más rápido no siempre es el más corto entre un punto y otro (línea recta), debido

a que existen condiciones en el terreno que afectan, entre las que se encuentran edificaciones, ríos, cuerpos de agua o pendientes muy pronunciadas, entre otros. Todo esto reduce drásticamente la velocidad de movimiento.

Por esta razón, el cálculo de la distancia entre dos puntos debe considerar la distancia, geometría y el costo en términos de tiempo y energía empleada para la ruta de evacuación. De acuerdo con el Centro de Preparación para Desastre del Asia – ADPC, siglas en inglés – (Laghi *et al.* 2006), para la creación de rutas de evacuación se debe reemplazar el concepto de distancia por el concepto de el *Costo Ponderado por Distancia* –CPD–.

Para poder aplicar el concepto de CPD, el trabajo se ha realizado en formato raster, con el fin de definir distancias por celda y el costo que involucra el paso de una celda a otra. Para este caso, el costo de pasar de una celda a otra se refiere a la velocidad de movimiento, siendo el movimiento más rápido el de menor costo.

La mayoría de los programas de SIG, poseen herramientas para el cálculo de la distancia más corta tomando en consideración el costo que involucra el paso de una celda a otra (Chang, 2008). El uso de esta herramienta se aplica para establecer un raster que contiene como valor de celda el costo o resistencia al paso de una celda a otra de un elemento (Figura 3). Este elemento pudiera ser agua, aire, flujo de agua subterránea, entre otros. En el caso de estudio, se utiliza la herramienta para determinar el costo de paso de la población desde las áreas factibles a inundación por eventual ruptura del dique costanero, hacia los refugios.

1	1	1	2	8
4	4	5	4	9
4	3	3	2	10
4	5	6	8	8
4	2	1	1	1

(a)

14,5	14,95	15,95	17,45	22,45
12	12,45	14,61	16,66	21,44
8	8,95	11,95	13,66	19,66
4	6,36	8	10	11
0	3	4,5	5,5	6,5

(b)

Figura 3. Ejemplo de datos en formato raster para el cálculo de costo. La celda inferior izquierda muestra la celda objetivo, el raster (a) contiene el valor local de costo. El raster (b) es el valor mínimo total de costo del camino hacia la celda objetivo (Modificado de De By *et al.* 2004).

Los SIG pueden determinar a partir del raster generado con el valor del costo, cuál sería la vía o ruta con el menor costo para llevar un elemento de un punto a otro. Los SIG calculan la distancia a partir del camino más corto.

Para el cálculo total de la distancia, los SIG tienen cuidado de tomar en cuenta las longitudes. Evidentemente, el paso de una celda a su celda vecina al este (sistema geográfico) es más corto que a la celda que está al noreste. El valor de la distancia entre estos dos casos es de $1:\sqrt{2}$. En la figura 3 se presenta un ejemplo gráfico de cual sería el raster de resistencia al paso o costo para el cálculo de distancias.

Los SIG para determinar el cálculo de la distancia tomando en cuenta el costo que involucra, de celdas continuas (norte, este, sur y oeste) utiliza la ecuación:

$$C_{obj} = \frac{1}{2} (valor(C_{obj}) + valor(C_{partida}))$$

Donde: C_{obj} es la celda objetivo y $C_{partida}$ desde donde se comienza a calcular. En la figura 3 se muestra una celda resaltada (esquina inferior izquierda) la cual es la C_{obj} . Si se toma como ejemplo el cálculo de resistencia o costo de la celda que se encuentra al este de ésta, el resultado sería:

$$3 = \frac{1}{2} (4 + 2)$$

Este resultado se le asigna a la celda del raster de costo. Para el caso de las celdas vecinas diagonales (noreste, sureste, suroeste y noroeste), la ecuación que se debe utilizar para el cálculo del costo sería:

$$C_{obj} = \frac{1}{2} (valor(C_{obj}) + valor(C_{partida})) \times \sqrt{2}$$

Si tomamos el mismo ejemplo de la figura 3 para el cálculo del costo para la celda que se encuentra al noreste, el resultado sería:

$$6,36 = \frac{1}{2} (4 + 5) \times \sqrt{2}$$

El raster generado que contiene el valor mínimo total de costo se puede definir como *Costo de superficie*. Este costo de superficie se puede elaborar a partir de los datos del uso de la tierra y la pendiente del área que se debe estudiar, debido a que se le asigna un valor de costo a cada uno de los elementos del terreno. Como se mencionó en párrafos anteriores, el costo para el cálculo de rutas de evacuación es la velocidad de movimiento, con lo cual surge un problema, porque para este caso a mayor velocidad de movimiento se obtiene mejores resultados, pero para los SIG esto sería un mayor costo. Por lo cual el costo de superficie está definido por la inversa de la velocidad de movimiento.

Para establecer el costo de superficie a partir de los datos del uso del suelo y de la pendiente del terreno, se asignó

un porcentaje de la velocidad de movimiento a cada tipo de elemento según las siguientes tablas 1 y 2.

Tabla 1. Porcentaje de velocidad de movimiento según uso de la tierra.

Uso de la tierra	% de velocidad de movimiento
Vías principales	100%
Vías secundarias	80%
Terreno baldío	70%
Área urbana baja densidad	50%
Área Industrial	30%
Área urbana alta densidad	20%
Manglar	5%
Diques	5%
Canal	5%

Tabla 2. Porcentaje de velocidad de movimiento según pendiente del terreno (Tomado de Laghi *et al.* 2006).

Pendiente (%)	% Velocidad de movimiento
0 - 3	100%
3 - 6	85%
6 - 9	70%
9 - 12	55%
12 - 15	45%
15 - 18	40%
18 - 21	35%
21 - 24	30%
24 - 27	25%
27 - 30	20%
30 - 33	15%
33 - 36	14%
36 - 39	13%
39 - 42	12%
42 - 45	11%
45 o más	10%

De acuerdo con Laghi *et al.* (2006), la velocidad de movimiento de las personas es de 4,35 km/h. Con el fin de ser conservadores con este renglón, se realizaron pruebas de caminatas con navegadores GPS, las cuales arrojaron como promedio de la velocidad de movimiento 3,8 km/h. Este es el valor utilizado para la creación de rutas de evacuación en el presente trabajo. En las tablas 3 y 4 se muestra la velocidad de movimiento para cada elemento en el terreno.

Tabla 3. Velocidad de movimiento según uso de suelo.

Uso de la tierra	Velocidad de movimiento (km/h)
Vías principales	3,8
Vías secundarias	3,04
Terreno baldío	2,66
Área urbana baja densidad	1,9
Área Industrial	1,14
Área urbana alta densidad	0,76
Manglar	0,19
Diques	0,19
Canal	0,19

Tabla 4. Velocidad de movimiento según pendiente del terreno.

Pendiente (%)	Velocidad de movimiento (km/m)
0 - 3	3,8
3 - 6	3,23
6 - 9	2,66
9 - 12	2,09
12 - 15	1,71
15 - 18	1,52
18 - 21	1,33
21 - 24	1,14
24 - 27	0,95
27 - 30	0,76
30 - 33	0,57
33 - 36	0,532
36 - 39	0,494
39 - 42	0,456
42 - 45	0,418
45 o más	0,38

Una vez obtenido el costo de superficie es fácil conseguir el Costo Ponderado por Distancia –CPD–. Para nuestro alcance estamos interesados en el más rápido y, en consecuencia, en el camino menos costoso entre un punto dentro de las áreas afectadas por la subsidencia y un punto de reunión (refugios). Este método tiene una limitación, porque es necesario calcular el CPD para cada punto de partida que queremos considerar, con el fin de evitar esto, se genera una superficie a partir de los datos del CPD.

En lugar de definir el CPD de superficie como la distancia entre el punto de partida y cada refugio, es posible definirlo como la distancia entre cada celda y los puntos de refugio. Podemos considerar la superficie CPD como superficie del suelo, es decir considerar los datos como montañas y valles, en los cuales los refugios de evacuación son los puntos más bajos de cada valle. A partir de esta similitud, podemos utilizar herramientas geoespaciales utilizadas en hidrología, y ampliamente desarrolladas en SIG, para la gestión de nuestra superficie. Por ejemplo, el camino más rápido desde un punto dentro de área de estudio al punto de reunión es coincidente con el curso de una gota de lluvia caída en el mismo punto.

Además, es posible definir el área de influencia de cada punto de evacuación, que es, a nuestra similitud, la subdivisión de las áreas de subsidencia en cuencas hidrográficas. La subdivisión en zonas de influencia puede ser muy útil en determinar el tiempo máximo de evacuación de cada área y compararla con el máximo de tiempo aceptable. Más aún, se puede realizar una revisión sobre la cantidad y ubicación de los refugios propuestos con el fin de comparar que los mismos tengan la capacidad de albergar la población que está dentro de su “cuenca”.

Con el fin de otorgar un resumen de la metodología utilizada en el presente trabajo de investigación, la figura 4 muestra un flujograma de los procesos para crear las rutas de evacuación.

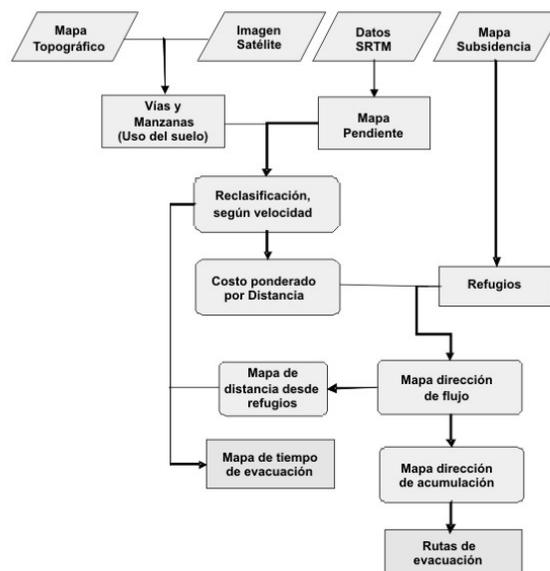


Figura 4. Diagrama de flujo de los procesos realizados para obtener las rutas de evacuación y tiempo necesario para evacuar.

DESARROLLO

Para la digitalización de las vías y tipo de manzanas (uso del suelo) de la zona de estudio, primero se realizó la corrección geográfica tanto de los mapas topográficos como de las imágenes del sensor SPOT-5. Los mapas topográficos disponibles para la zona datan de 1976, los cuales han sido levantados bajo el sistema de referencia Provisional Suramérica 1956 –PASD 56–, datum La Canoa, por lo cual fue necesario georreferenciarlos en este sistema, para después hacer una reproyección de estos al sistema de referencia WGS84, con el fin de utilizarlos como base para la corrección geográfica de las imágenes SPOT-5. Para realizar estos procedimientos, se utilizó el programa ERDAS IMAGINE versión 8.7, desarrollado por la empresa Leica Geosystems.

Las imágenes SPOT-5 fueron mejoradas digitalmente por medio de las herramientas disponibles en ERDAS, antes de ser cargadas en el sistema de información geográfica creado para el trabajo, con el fin de realzar el contraste de los elementos que se deben extraer (vías, tipo de uso suelo, entre otros.).

Debido a que el área de estudio no se cubre con un solo mapa topográfico ni con una sola imagen SPOT-5, fue necesario crear un mosaico de estos para tener una imagen que cubriera toda la zona de estudio tanto de los mapas topográficos como de las imágenes SPOT. Este mosaico se realizó con la herramienta disponible para ello en el programa ERDAS.

Después de realizar todas las correcciones geométricas y mejoramientos digitales necesarios, se procedió a crear un SIG del área de estudio, utilizando el programa ArcGIS versión 9.1 desarrollado por ESRI inc. El SIG está compuesto por los mosaicos de los mapas topográficos y de las imágenes SPOT-5, los ficheros de datos en formato shapefile de las vías, manzanas, curvas de subsidencia y centros de refugio, además del modelo digital del terreno del área de estudio creado a partir de los datos SRTM descargados de la zona, el cual se utilizó para generar el raster de pendientes. El fichero de datos de manzanas y vías fue completado con información a partir de la interpretación visual de las imágenes SPOT-5. El producto final de la digitalización de las vías y manzanas se puede observar en la Figura 5.

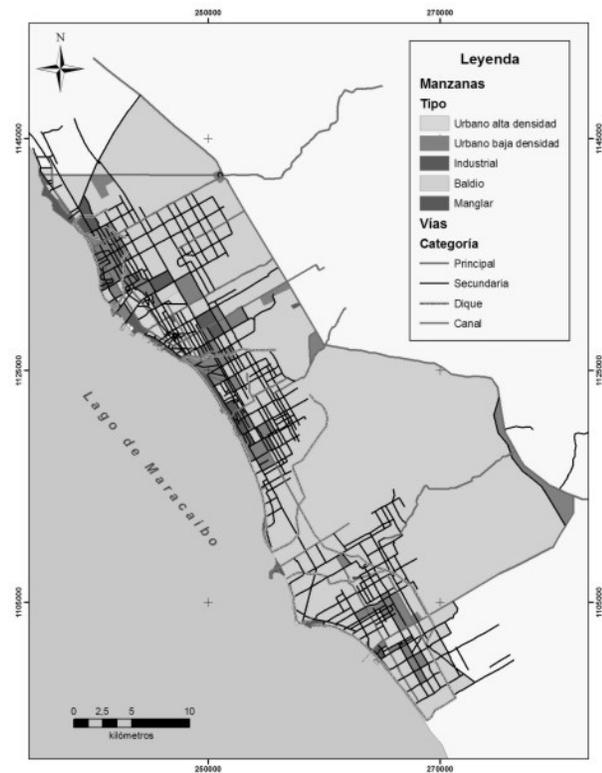


Figura 5. Mapa de usos del suelo.

El fichero que contiene la ubicación de los refugios, fue creado a partir de la digitalización de la ubicación de los refugios propuestos en el plan de contingencia de la costa oriental del lago (MARAVEN, 1992), los cuales se encuentran fuera del área afectada por la subsidencia.

Para la creación de las rutas de evacuación de las zonas afectadas por la subsidencia en caso de una ruptura del dique costanero, se convirtieron los datos vectoriales (vías y manzanas) generados a partir de la digitalización de las imágenes de satélite a formato raster, con un tamaño de celda de 5x5. Después de esto se procedió a realizar un reclasificación de los elementos del terreno según las tablas 3 y 4. Debido a que las vías y las manzanas se encuentran en ficheros diferentes, el primero de líneas y el segundo de polígonos, se crearon raster separados los cuales fue necesario unificar junto al raster de pendiente del terreno por medio de la herramienta Mosaic To New Raster disponible en el programa ArcToolBox de ArcGIS; se tomó en consideración el método de mosaico que se colocó como valor de la celda el valor máximo entre los tres raster que, en este caso, sería el valor con mayor velocidad de movimiento.

A partir de este último raster se generó la superficie de costo, el cual no es más que el inverso de la velocidad. Para obtener esto se utilizó la herramienta raster calculator de Spatial Analyst de ArcGIS, la cual dio como resultado el raster necesario para general el Costo ponderado de la Distancia –CPD– a partir de los refugios (Figura 6).

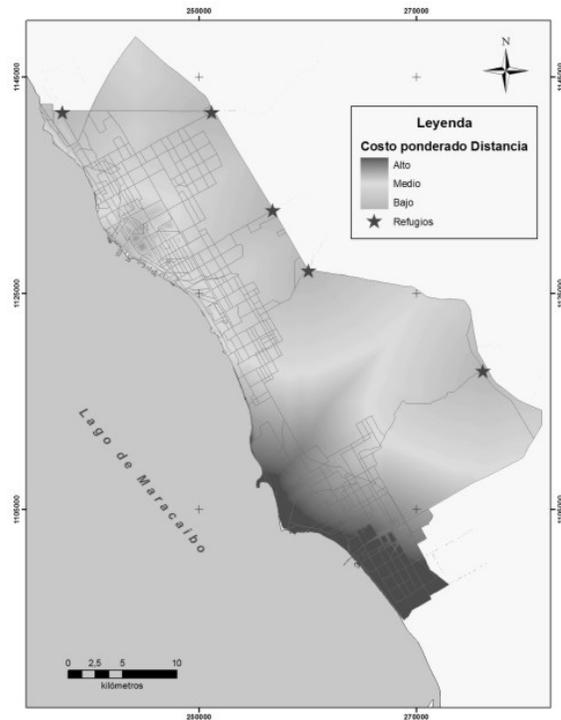


Figura 6. Raster del Costo Ponderado por Distancia (CPD).

Una vez obtenida la superficie del Costo Ponderado por Distancia –CPD–, se generaron los mapas en formato raster de la dirección de flujo y dirección de acumulación, utilizando las herramientas disponibles para hidrología dentro de Spatial Analyst Tools. El CPD fue dato de entrada, como superficie a partir de la cual se generan el flujo y acumulación de elementos que, en este caso, serán las personas que deben evacuar las zonas en subsidencia hacia los refugios en caso de una ruptura del dique costanero.

A partir de los mapas de dirección de flujo y acumulación, se puede generar el mapa de divisoria de cuencas que, en este caso, sería el área de influencia de cada centro de refugio. Una vez obtenidas las áreas de influencia de cada refugio se puede calcular el tiempo máximo de evacuación de cada una de éstas (Figura 7) y comparar con el tiempo estimado de inundación de las zonas deprimidas en caso de una ruptura del dique costanero.

Para la creación de las rutas de evacuación se utilizó una extensión gratuita de ArcGIS, Hydrologic Modeling, la cual se puede descargar desde el portal Web de ESRI Inc. Esta extensión posee una herramienta para la visualización del curso de una gota de agua que cae dentro del área de estudio, utilizando la información de los mapas de dirección de flujo y acumulación. Como se indicó, el curso de una gota de agua será igual que la ruta de evacuación, es decir la ruta más corta y rápida desde cualquier celda del área de estudio hacia los refugios. En las figuras 8 y 9 se muestran algunos ejemplos de rutas de evacuación generada para dos refugios

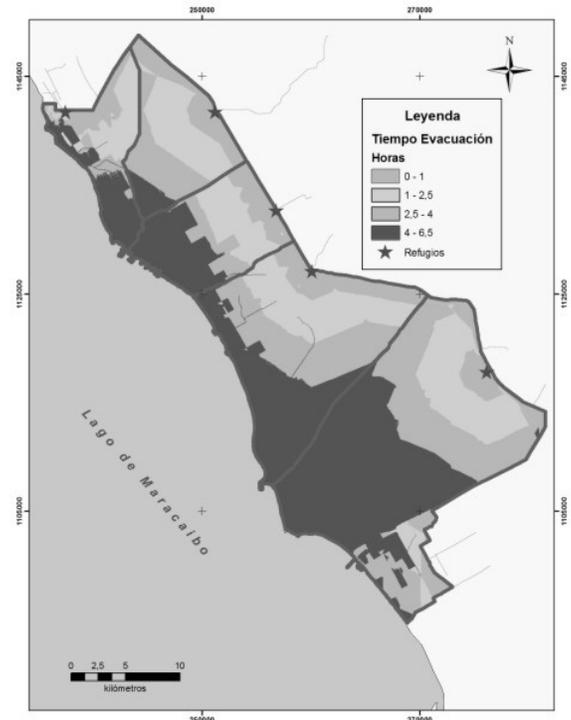


Figura 7. Tiempo de evacuación hacia los refugios.

distintos. Para crear las rutas ejemplo se tuvo el cuidado de escoger una edificación que se encuentre en la zona más deprimida del área. El SIG es capaz de generar rutas de evacuación de cualquier punto de la zona de estudio, por lo que se pueden elaborar tantas rutas de evacuación como edificaciones existentes dentro de la zona de subsidencia.

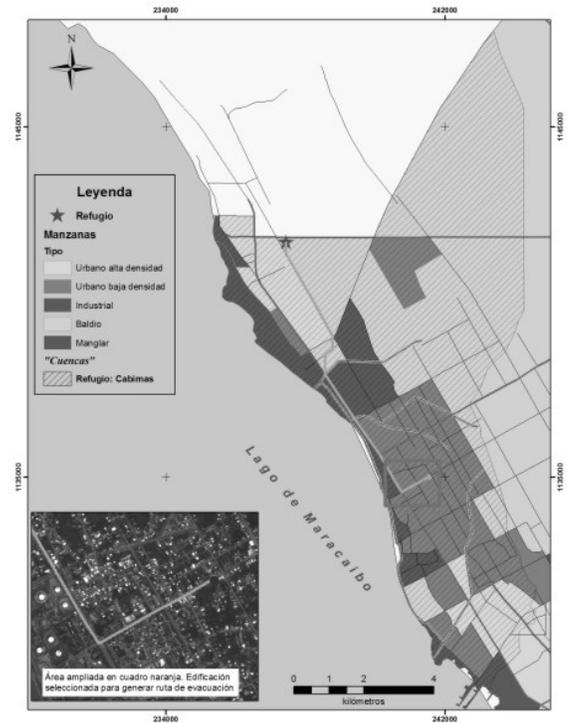


Figura 8. Ejemplo de ruta de evacuación para el refugio Cabimas.

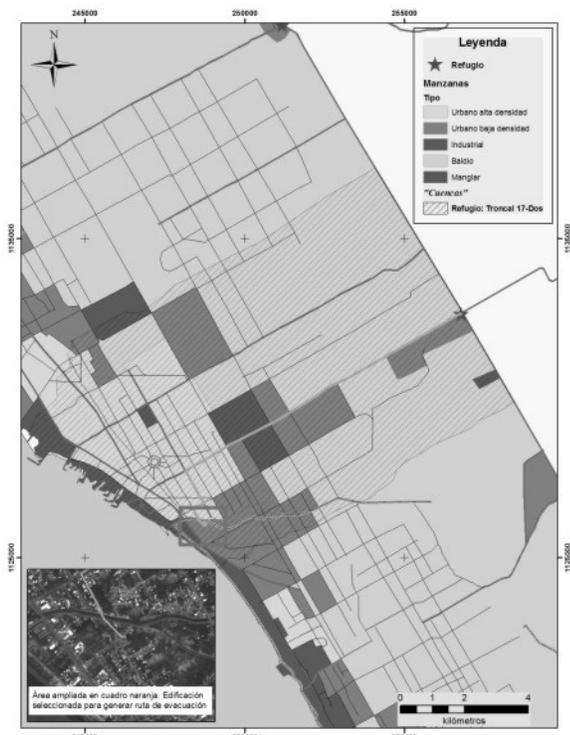


Figura 9. Ejemplo de ruta de evacuación para el refugio Troncal 17-Dos.

Las rutas de evacuación elaboradas presentan los senderos con la mayor capacidad de movimiento, lo cual implica un menor tiempo para arribar a los refugios disponibles. El SIG tiene la capacidad de generar tantas rutas como puntos de partida seleccionados dentro del área de estudio.

Al realizar un solapamiento del tiempo de evacuación y las curvas de subsidencia, queda en evidencia que los refugios propuestos se encuentran muy alejados de las zonas afectadas, debido a que el tiempo de evacuación de las áreas más afectadas por la subsidencia hacia los centros de refugios es de más de 4 horas. De acuerdo al plan elaborado para la zona (MARAVEN, 1992), las estimaciones del tiempo de inundación ante una eventual ruptura del dique es de 2,5 horas, por lo que se debe plantear el establecimiento de refugios temporales donde las personas se reúnan y luego sean trasladadas hacia los refugios definitivos, utilizando un medio de transporte más rápido que el pedestre. Estos refugios provisionales deben estar ubicados afuera de las zonas deprimidas y protegidos por los diques internos presentes en la zona, con lo cual se garantiza la seguridad de los mismos y que estos estarán operativos por el período de tiempo necesario para evacuar toda la población. Los refugios definitivos pueden ser los mismos que están planteados en el plan de contingencia, porque están fuera del área de subsidencia, es decir que no serán afectados por la inundación.

El plantear estos refugios implicaría elaborar nuevamente

las rutas de evacuación y estimar el nuevo tiempo de evacuación de las zonas afectadas. En la figura 10 se presenta el mapa con el nuevo tiempo estimado para evacuar las zonas afectadas.

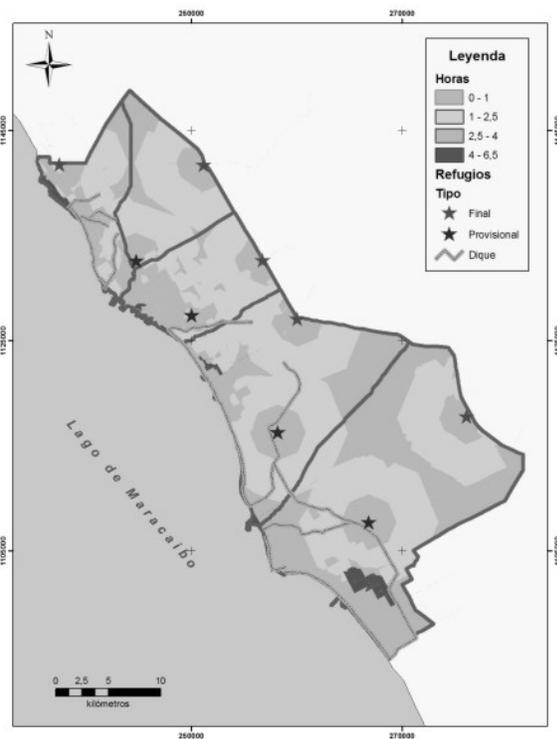


Figura 10. Nuevo mapa de tiempo de evacuación con los refugios provisionales.

Después de generar más de 50 rutas de evacuación de 50 diferentes puntos de partida ubicados dentro de las zonas afectadas por la subsidencia, se observó que un 85% de las mismas son rutas factibles, mientras que el 15% restante no son factibles, porque estas rutas atraviesan zonas imposibles de superar por las personas que están evacuando, por ejemplo, edificaciones, zonas anegadas, entre otras. Esto se debe a que el detalle de digitalización de los elementos es muy grueso y el SIG no reconoce estos obstáculos en el terreno.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede decir que el Sistema de Información Geográfica –SIG– en formato raster, generado para las zonas afectadas por la subsidencia con el objetivo de crear las rutas de evacuación en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo –COLM–, funciona y cumple con las expectativas planteadas al comienzo del estudio.

El 85% de las rutas de evacuación generadas tienen grandes probabilidades de factibilidad. Sólo faltaría realizar una evaluación en campo para asegurar que la misma cumpla con el objetivo de movilizar a las personas de las zonas no seguras a una zona segura en caso de una eventual ruptura del dique costanero.

El 15% de las rutas generadas, presenta poca o ninguna probabilidad de factibilidad, debido a que en el recorrido de las mismas se encuentran obstáculos imposibles de superar por las personas que realicen la ruta. Estos obstáculos son edificaciones que bloquean la ruta o condiciones del suelo que impidan el paso (pequeñas lagunas, pantano, entre otros).

Se puede concluir que la metodología utilizada en el presente trabajo para generar rutas de evacuación, es factible de aplicar en otras zonas geográficas con otras condiciones de amenaza. Debido a que esta metodología se ajusta a las condiciones presentes, sólo se debe contar con la información base para generar las rutas de evacuación.

Se recomienda realizar una evaluación en campo de las rutas de evacuación generadas, con el fin de comparar que las mismas son factibles de realizar ante una eventual necesidad de evacuar las áreas afectadas por la subsidencia, en caso de la ruptura del dique costanero.

Con el propósito de mejorar la calidad de las rutas de evacuación, se debe realizar una digitalización de cada edificación presente en la zona, así como de las condiciones individuales en el terreno que imposibiliten el desplazamiento de las personas, a una escala que el SIG pueda reconocer con un Costo Ponderado por Distancia (CPD) muy elevado y descartar estas zonas al momento de generar la ruta; es decir, calcule otra dirección de la ruta que supere el obstáculo.

Se recomienda integrar las rutas de evacuación generadas en este estudio (después de realizada la validación en campo) al plan de contingencia que posee la COLM y al plan de desarrollo urbano de la zona, con el fin de garantizar la permanencia y efectividad de las rutas.

Se recomienda considerar la creación de los refugios provisionales propuestos con el fin de mejorar la velocidad de evacuación de las zonas afectadas por la subsidencia en caso de una ruptura del dique costanero, con el propósito de garantizar la seguridad de la población residente en esta zona geográfica.

Se recomienda la integración de esta información en los planes de ordenamiento urbano de la zona a fin de garantizar la disponibilidad de rutas eficientes para la evacuación de las zonas afectadas en caso de la ruptura del dique.

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere expresar su agradecimiento a FUNVISIS, al otorgar el apoyo económico y profesional para poder realizar los estudios de maestría que generaron esta investiga-

ción. A Daniel Moreno, quien siempre ayudó a conseguir material bibliográfico valioso. También a todo el personal de UNIGIS Girona, tanto a profesores como personal administrativo, quienes en todo momento estuvieron dispuestos a colaborar. Al Dr. Ramiro Salcedo del FII-CPDI, quien prestó el apoyo para adquirir las imágenes de SPOT-5 utilizadas en este trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- CHANG, K. (2008). *Introduction to geographic information systems*. Tata McGraw-Hill. Cuarta edición. New Delhi-India. Pág. 450.
- COVENIN, (2001). *Edificaciones Sismorresistentes*. Norma Venezolana COVENIN 1756:2001. Comisión Venezolana de Normas Industriales, Fondonorma, MCT, MINFRA, FUNVISIS, Caracas.
- DE BY, R., KNIPPERS, R., WEIR, M., GEORGIADOU, Y., KRAAK, M., WESTEN, C., SUN, Y. (2004). *Principles of geographic information systems*. International Institute for geo-information science and earth observation, ITC. Holanda. Pág 483.
- FEBRES, G. (1990) *Subsidence and compaction due to fluid extration in Venezuelan oil-producing areas*. Revista técnica INTEVEP Vol. 10(1). Caracas-Venezuela Pág. 37-46.
- HENNEBERG, H., BADELL, C. A., DREWES, H. (1980) *Investigaciones recientes sobre la subsidencia de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo*. s.n.
- HYDROLOGIC MODELING: <http://edn.esri.com/index.cfm?fa=codeExch.sampleDetail&pg=/arcobjects/9.1/Samples/SpatialAnalyst/HydrologicModeling/HydrologicModeling.htm> Fecha de acceso: 07 diciembre 2007.
- INE (2009) <http://www.ocei.gov.ve> Datos censo Venezuela, 2001. Fecha de acceso. 21 enero 2009.
- LAGHI, M., CAVALLETTI, A., POLO, P. (2006) *Coastal risk análisis of Tsunamis and enviromental remediation*. Asian Disaster Preparedness Center. Klong Luang-Thailand. Pág. 98
- MARAVEN (1992). *Plan de contingencia contra riesgos de inundación en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (PLAN COLM)*. Ciudad Ojeda 25 p.

NUÑES, O. & ESCOGIDO, D. (1976) *Subsidence in the Bolívar Coast. International Symposium on Land Subsidence* (Second Symposium. Anaheim, California, 13-17 Dec 1976).

SULLY, J. P. & MURRIA, J. (1996). *Microzonificación sísmica en la costa oriental del Lago de Maracaibo*. Venezuela. INTEVEP- Caracas s/n.