

Los sistemas de información geográfica y su aplicación en enlaces de comunicaciones

Jorge Sosa-Pedroza
Fabiola Martínez-Zúñiga

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Instituto Politécnico Nacional.
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos"
Edif. Z4, 3er. piso, Col. Lindavista, México DF.
MÉXICO.

correo electrónico: jsosa@ipn.mx
dominio300@prodigy.net.mx

Recibido el 30 de abril de 2008; aceptado el 3 de octubre de 2008.

1. Resumen

En el campo de la prospección terrena, los sistemas de información geográfica (SIG) como herramienta computacional, se usan en diversas aplicaciones; los sistemas de comunicaciones no son la excepción, ya que organizan digitalmente los tipos diferentes de terreno, sus elevaciones, distribución y altura de edificios sobre las ciudades y otras características, haciéndola ideal en el cálculo de enlaces punto a punto o radiodifusión. Se presenta en este trabajo una descripción general de los SIG y se propone una metodología para enlaces de comunicaciones para terminar con el desarrollo de un ejemplo de aplicación.

Palabras clave: sistemas de información geográfica, enlaces de comunicaciones terrestres, bases digitales de terreno.

2. Abstract (Geographic Information Systems and its Application in Communication Links)

The Geographic Information Systems (GIS) are widely used as a computational tool, for terrain prospection and their applications have reached the Communication Systems, its feasibility to digitally organize terrain elevations, height and distribution of city buildings and other characteristics, make the GIS an important tool in the design of point to point or broadcasting communication links. This paper presents a general description of the GIS, proposing a methodology for

the design of communication links, finishing with an application example.

Key words: sistemas de información geográfica, enlaces de comunicaciones terrestres, bases digitales de terreno.

3. Introducción

Los sistemas de información geográfica tienen aplicaciones tales como: descripción del terreno en función de coordenadas espaciales, caracterización de asentamientos humanos, definición de uso de suelo, diseño de mapas de riesgo específico, y muchas otras. En telecomunicaciones los sistemas de información geográfica se usan en el diseño de enlaces, a partir de ellos, frente a una computadora, se puede definir la línea de vista del enlace o la presencia de obstáculos en el terreno y la búsqueda de alternativas que lo hagan viable. En una ciudad, en enlaces punto a punto o de radiodifusión, los edificios representan obstáculos que deben ser considerados en el cálculo de atenuación debido a los efectos de reflexión, difracción y refracción, por lo que se requiere contar con información de alturas, localización, materiales de construcción, etc. Por otro lado los perfiles de terreno deben igualmente ser considerados, además de los ya comunes sobre lluvia, neblina, nieve, etc., que afectan la propagación. Con los sistemas actuales de cómputo, especialmente los sistemas de información geográfica (SIG), es posible, mediante bases de datos previamente obtenidas, visualizar todos los efectos presentes en el cálculo de un enlace de comunicaciones, usando superposición de mapas individuales que describen por separado e individualmente cada fenómeno.

Este trabajo establece una metodología que emplea los sistemas de información geográfica para el diseño de sistemas de comunicaciones utilizando las bases de datos necesarias, tales como: características de espacio libre, perfiles de terreno, presencia de obstáculos y su composición, etc.; en las ciudades la altura y posición geográfica de edificios, así como la caracterización media de materiales de construcción, el régimen de uso de suelo y otros datos. La propuesta está fundamentada en las bases digitales de terreno (BDT) que sistematizan el análisis y diseño de enlaces de comunicaciones. Como ejemplo se presenta el diseño de un enlace de comunicaciones usando BDT de la ciudad de México. Es deseable que la metodología y su aplicación que se presentan

en este artículo, sirvan de referencia para aquellos interesados en diseñar enlaces de comunicaciones.

4. Desarrollo

4.1 Modelos digitales del terreno

Los modelos digitales de terreno (MDT) han nacido y desarrollado al amparo de las tecnologías de cómputo [1], se definen como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio que cumplen con dos condiciones suplementarias [2]:

1. Debe existir una estructura interna que represente las relaciones espaciales entre los datos, y
2. La variable representada en el modelo debe ser cuantitativa y de distribución continua.

Puede entonces considerarse que un MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua [3,4].

Un papel importante en los MDT lo juega el modelo digital de elevaciones (MDE) que describe la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados; a partir de la información contenida explícita o implícitamente en el MDE, es posible construir un conjunto de modelos derivados más sencillos que reflejan características morfológicas tales como pendientes y orientación. Por otro lado, incorporando información auxiliar se pueden elaborar otros modelos más complejos, utilizando tanto la descripción morfológica del terreno como simulaciones numéricas de procesos físicos. Los MDT descritos arriba son esencialmente modelos estáticos (en los que las propiedades representadas permanecen con valores inmutables), pero su naturaleza digital permite utilizarlos para realizar procesos de simulación dinámica con cierta facilidad.

Es claro que los MDT, como herramienta básica, son de gran utilidad en el diseño de sistemas radioeléctricos; sin embargo, tanto su uso como el desarrollo de sus aplicaciones aún no ha sido adoptado de forma general por los equipos de trabajo debido a que el *software* que se requiere para manejar la gran cantidad de información que contienen los mapas, así como su superposición, es muy caro.

4.2 Sistemas de información geográfica

Aunque no existe una definición absoluta para los sistemas de información geográfica (SIG), puede decirse que son un conjunto de herramientas que permiten el procesamiento de información de datos de tipo espacial usados para tomar decisiones acerca de cierto espacio o área específica de la



Fig. 1. Vista de las capas de un SIG.

Tierra o también para visualizar de forma general un espacio de acuerdo al contenido de base de datos digital. David Rhind [5] define más simplemente a las SIG como un "sistema de computación" para comprobar, integrar y analizar información relacionada con la superficie de la Tierra". El *software* es importante en el manejo de la información, pero lo es más en la comprensión del funcionamiento del subsistema natural para el manejo eficiente de la información y de los mapas asociados. El SIG colecta, comprueba, analiza e integra innumerables tipos de operaciones, conjuntadas en subsistemas según las aplicaciones, tales como:

1. Entrada de datos de varios orígenes, colectados y procesados como datos espaciales.
2. Almacenamiento de datos que permita recuperar, editar y actualizar la información.
3. Análisis, manipulación, presentación de tareas, manejo de datos adicionales, parámetros estimados, contrastes entre subsistemas y presentación de funciones modeladas.
4. Despliegue de todo o parte de la base de datos en forma de gráficos, tablas o mapas.

Todos los subsistemas interactúan entre sí gracias a que los SIG están completamente automatizados, lo que permite la evaluación completa del sistema. La figura 1 muestra una vista de las capas de un SIG.

En particular, para la construcción de mapas, se aplica la siguiente metodología:

- Colección de datos: fotos aéreas o satelitales e información previamente obtenida.
- Procesamiento de datos: clasificación, bajas, altas, análisis y procesos iterativos.

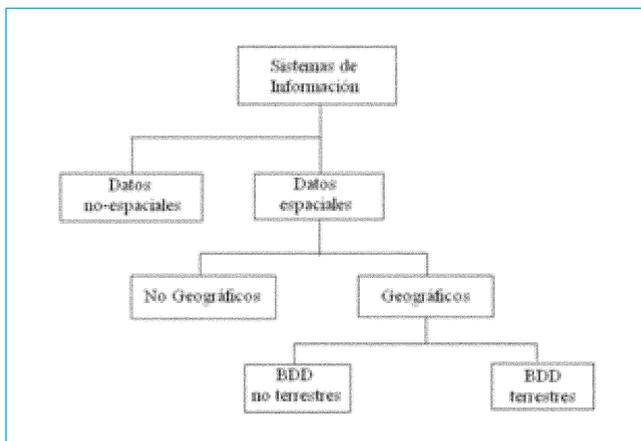


Fig. 2. Organización de un sistema de información.

- Elaboración preliminar de mapas: en algunas ocasiones un mapa preliminar es usado para obtener otros mapas, dependiendo del número de capas utilizadas.
- Extracción y elaboración final del mapa.

En general un sistema de información contiene datos espaciales y no espaciales; los SIG trabajan con datos espaciales, mientras que la información no espacial trata de porciones del espacio que no poseen ningún tipo de geocódigo, pero deben ser consideradas ya que forman parte del sistema. Los datos espaciales, se subdividen en geográficos y no geográficos, como muestra el diagrama de la figura 2.

En el diagrama se observa que los datos espaciales se subdividen en geográficos y no geográficos. Los primeros se enfocan a información natural del terreno y se almacenan en una base digital de datos (BDD) terrestres, como elevaciones y características de terreno, mientras que los segundos



Fig. 3. SIG sobre censos.

contienen datos geocodificados representando elementos no naturales almacenados en una BDD no terrestre, como los sistemas de información de censos, que recolectan información de la población sobre determinada área, mostrando actividades económicas para aplicaciones específicas; el SIG muestra la información de terreno y lo que está sobre él, como indica la figura 3.

Otro ejemplo de sistemas no terrestres es el que se refiere a la evaluación de un hábitat, como bosques, flora, fauna, contaminación, para administración e investigación científica, como muestra la figura 4.

Debido a que los SIG describen el área de análisis con mucha precisión, se usan para el análisis e investigación de características específicas de la Tierra. La tecnología SIG ofrece enormes posibilidades para análisis simples o sofisticados, siendo una poderosa herramienta para caracterizar, de modo preciso, un terreno específico. El desarrollo futuro de los SIG parece no tener límite.

4.3 Diseño de la base de datos

El diseño de la base de datos, comprende tres etapas:

- *Diseño conceptual.* Aquí se identifican los requerimientos de información y los datos disponibles relacionados con ellos, que a su vez generan un modelo conceptual y una definición clara para el usuario en relación con la aplicación.
- *Diseño lógico.* Consiste en la concepción general del sistema, mediante la integración de los modelos particulares para generar un modelo global de información, lo que permitirá eliminar redundancias y optimizar el esquema formal de la base de datos (modelo lógico).
- *Modelo físico.* Representa la última etapa, consiste en el desarrollo computacional de la base de datos (diseño de registros, archivos, métodos de acceso, restricciones de seguridad, etc.). El propio diseño determina las dimensiones del equipo tales



Fig. 4. Administración de un hábitat.

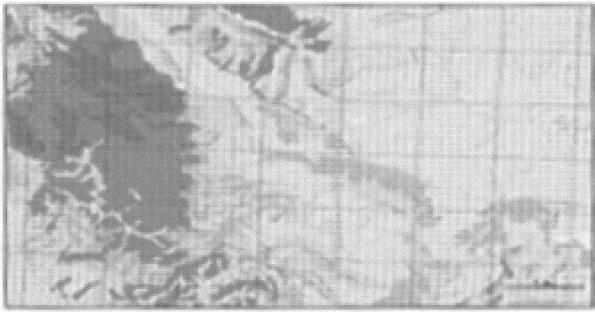


Fig. 5. Modelo digital de elevación (MDE).

como características de memoria, velocidad de procesamiento, etc., por lo que el modelo físico puede rediseñarse en función del equipo disponible.

Las etapas descritas son dinámicas, ya que los modelos deben sujetarse a revisión y actualización constantes debido, entre otros factores, a:

- Evolución de las necesidades internas y externas de la información.
- Especificaciones más detalladas de los datos.
- Nuevos equipos y herramientas computacionales.

El diseño conceptual de bases de datos geográficos se inicia con la revisión del contenido de los productos tradicionales de información (cartas, reportes, estudios). La revisión permite analizar en toda su extensión los contenidos detectando inconsistencias, duplicidades o elementos complementarios a la información ya disponible.

El modelo físico que convierte la información geográfica a forma digital, permite analizarla usando métodos estadísticos

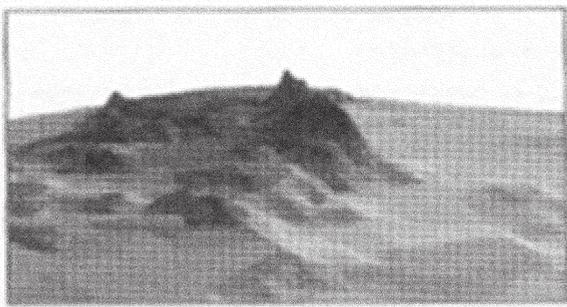


Fig. 6. Imagen satelital.

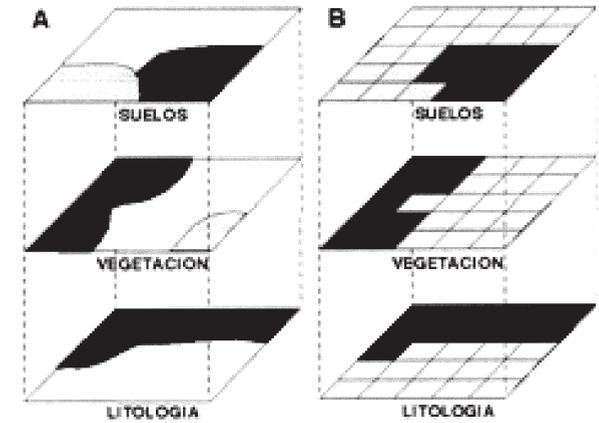


Fig. 7. A) Aproximación raster. B) Aproximación vectorial.

y geométricos y consultas de las bases de datos, generando un SIG a partir de las propias necesidades.

Los datos se clasifican de acuerdo a su naturaleza en tres tipos:

- raster
- vectorial
- alfanumérico

La información raster se presenta como imagen, tal como imágenes satelitales o modelos de elevación con una división cartográfica como muestran las figuras 5 y 6.

El tipo vectorial presenta los datos provenientes de las cartas a diferentes escalas, mientras que el tipo alfanumérico contiene los datos en forma de tablas y textos. La figura 7 muestra la representación con datos raster y vectoriales.

Para cada tipo de información es necesario contar con la definición explícita de su contenido, estructura, relaciones y normas que los rigen así como sus dimensiones mínimas; la representación geométrica en una base de datos geográfica se denomina entidad, tal como un punto, una línea o un área, y está determinada por la naturaleza del rasgo geográfico que representa y su escala; las dimensiones mínimas que definen longitud y ancho y aseguran que el rasgo habrá de recuperarse de los datos sin confusiones en sus dimensiones, las entidades puntuales no tienen tamaño mínimo y todas sus ocurrencias se incluyen en la base de datos, mientras que las dimensiones mínimas en una entidad lineal se definen en función de la longitud y ocasionalmente del ancho, como se muestra en la figura 8. A veces se incorporan ciertas entidades de área con representación puntual, pero deben considerarse los requisitos de dimensiones mínimas [6].

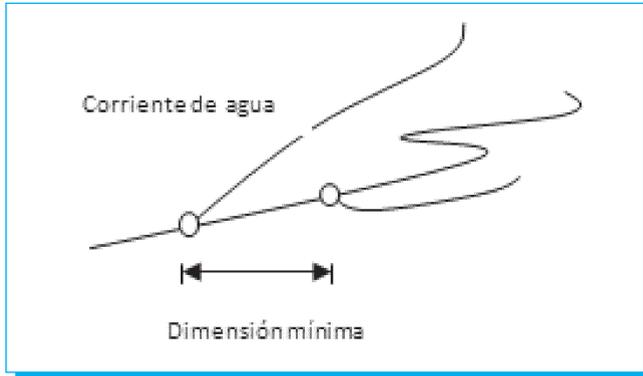


Fig. 8. Entidad lineal.

4.4 SIG: Metodología de aplicación

El SIG, es un subsistema dentro del sistema general, su construcción consta de las siguientes etapas:

1. Creación de un subsistema de entrada de datos reunidos y procesados como datos espaciales de varios orígenes.
2. Generación de un subsistema de recuperación y almacenamiento que organice los datos espaciales para ser recuperados, actualizados y editados.
3. Diseño del subsistema de análisis y presentación de tareas.
4. Diseño de un subsistema que despliegue la base de datos, en forma de gráficos, tablas o mapas.

4.5 Metodología aplicada a comunicaciones

Se propone en este trabajo una metodología usando un SIG para enlaces de comunicaciones y el empleo de la herramienta ArcGis [7] para digitalizar la información; en general la información es de tipo raster, tanto de los mapas de terreno como de edificios,. El procedimiento es el siguiente:

1. Se obtienen los mapas que se refieren a la zona de estudio.
2. Se procede a georreferenciar la posición para generar el mapa de la primera capa.
3. La segunda capa se refiere a la altura de cotas topográficas que igualmente es transformado a datos digitales.
4. La tercera capa es alfanumérica y se refiere a la altura de los edificios para definir un mapa de colores sobre los otros dos mapas.
5. A partir de los mapas se localizan los puntos del enlace o las zonas de cobertura para efectos de radiodifusión.
6. El SIG proporciona los datos necesarios, en cotas topográficas y alturas de edificios para generar el perfil de terreno.

7. Se traza la línea del enlace punto a punto o varias líneas para el caso de radiodifusión, para obtener lo que llamamos perfiles de trayectoria.
8. Los perfiles de trayectoria permiten construir gráficas de altura de obstáculos y definir las zonas de Fresnel, mediante un programa de cómputo en MATLAB alimentado de la base de datos generada por el SIG.
9. La atenuación de trayectoria se obtiene usando los modelos para comunicaciones urbanas [8].

4.6 Ejemplo de aplicación

Como ejemplo de aplicación de la metodología SIG en un sistema de comunicaciones, presentamos en este trabajo el diseño de un enlace de radio punto a punto en la delegación Gustavo A. Madero (GAM), del DF, usando una base digital de terreno, superpuesta con otra base de datos con información de altura de edificios. El procedimiento incluye la generación de una herramienta que permite graficar en forma ágil y precisa perfiles de terreno usados en el diseño de enlaces de comunicaciones.

El Distrito Federal es una extensión de terreno muy compleja, tanto por las variaciones altimétricas del terreno como por las diferentes alturas de edificios sobre su territorio; representa el 0.1% de la superficie del país y se ubica entre las coordenadas 19°29' y 19°54' de latitud norte y 99°06'48.59" y 99°07'23.75 de

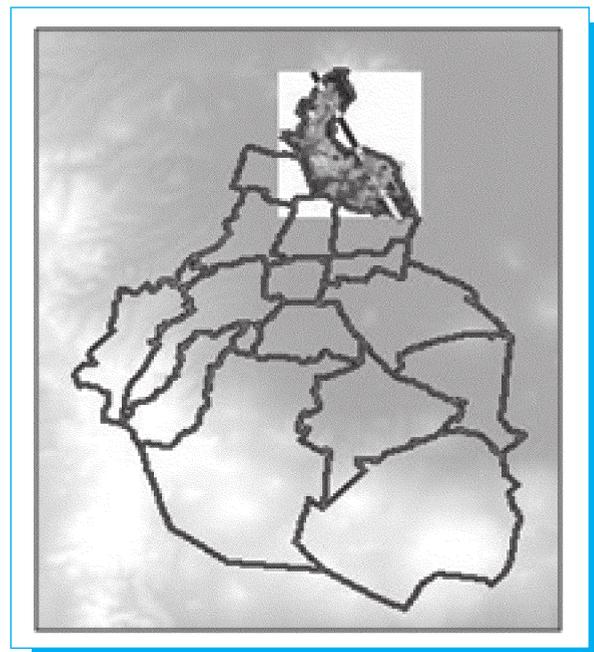


Fig. 9. La delegación GAM en el Distrito Federal.

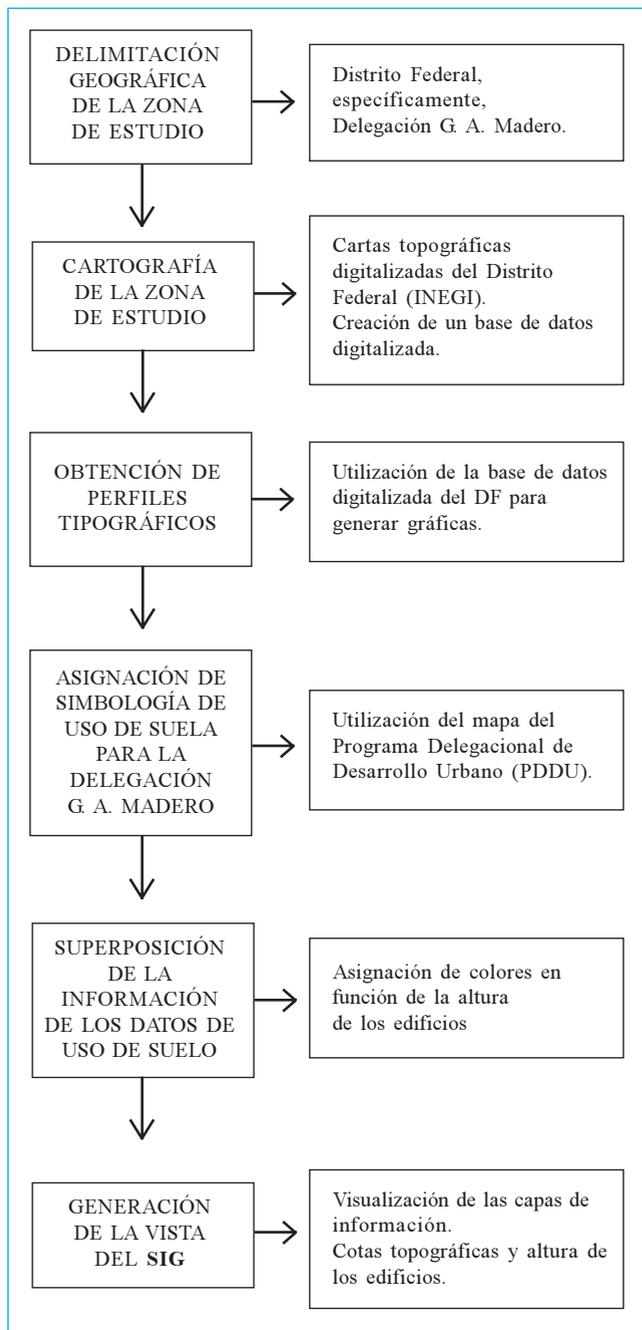


Fig. 10. Etapas de construcción del SIG.

longitud oeste, con una superficie aproximada de 1 484 km², el 35.8% es llanura, casi plano y sin altibajos, en la que se localiza la mayoría de las delegaciones; el porcentaje restante presenta un suelo accidentado rodeando la zona urbana, la altura varía entre los 2 240 metros sobre el nivel del mar sobre las partes más planas hasta unos 3000 metros en las partes más

accidentadas. La superficie de la delegación GAM es de 85.858 km² y ocupa el 5.9 % del territorio del DF; sus coordenadas geográficas son: 19°36' y 19°27' de latitud norte y 99°03' y 99°11', de longitud oeste, la figura 9 la localiza sobre el mapa del DF. Para nuestro caso el SIG se construyó siguiendo las etapas de la figura 10. La primera capa del SIG se obtiene de la ubicación georreferenciada de la zona de estudio. La segunda capa del SIG se construye a partir de la información de altimetría, que en general es limitada y poco actualizada [9,10], para este trabajo se usó la base de datos de 46 cartas topográficas digitalizadas de altimetría del INEGI con una escala de 1:20000, procesada con ArcGis que escanea, digitaliza y transforma en datos la altitud, longitud y latitud.

Las cartas se leyeron con un paso de muestro de 20 metros, para generar información de altimetría con la que se construyen imágenes en tercera dimensión. La figura 11 muestra esta capa para la GAM usando las cartas topográficas E14A27 y E14A37 del proyecto México de escala 1:20,000 [11].

La tercera capa de información está relacionada con la altura de los edificios. Las construcciones de la ciudad de México son muchas y de diferente índole, sus características se definen en el "Reglamento de Construcción de la Ciudad de México" [12], en función de cualquiera de las tres zonas en donde están asentadas, de acuerdo con los artículos 33 y 219:

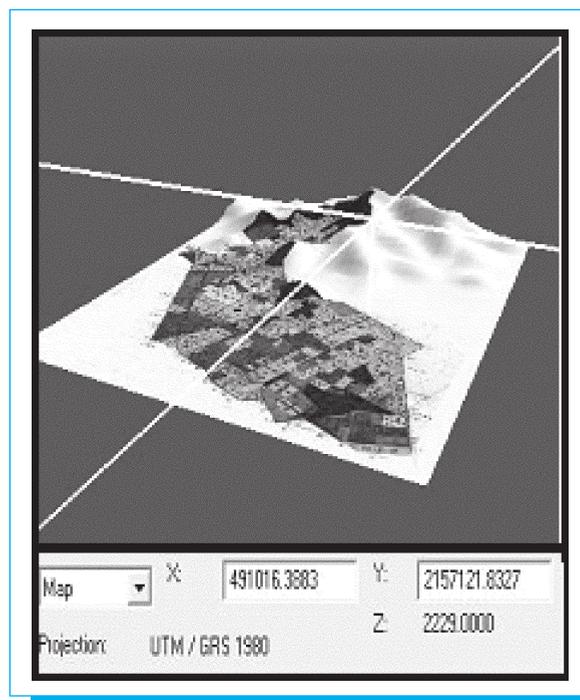


Fig. 11. Mapa de altimetría para la GAM.

Tabla 1. Clasificación de altura de edificios de la GAM.

| COLOR | ALTURA (m) | NÚMERO DE PISOS |
|----------|---------------|-------------------|
| ROJO | 7.2 | 2 |
| AMARILLO | 10.8 | 3 |
| AZUL | 14.4 | 4 |
| VIOLETA | 18.0 | 5 |
| MORADO | 21.6 | 6 |
| VERDE | PROMEDIO 10.0 | RESERVA ECOLOGICA |

- Zona I. Lomas
- Zona II. Transición y
- Zona III. Lacustre

En función de esta división, las normas de construcción en el DF sujetan los usos de suelo a la zonificación como lo señala el artículo 19 de la Ley de Desarrollo Urbano capitalino, en particular la norma 7 "Alturas de Edificación y Restricciones en Colindancia de Predios", establece que la altura máxima entre piso terminado a piso terminado será de 3.60 m y divide el uso de suelo en:

1. uso residencial
2. uso comercial
3. uso Industrial
4. reserva ecológica

Para el enlace en la delegación GAM se consultó el Programa de Desarrollo Urbano local, que define los usos de suelo y sus delimitaciones geográficas. La tabla 1 muestra la clasificación de alturas de edificios de la zona y la figura 12

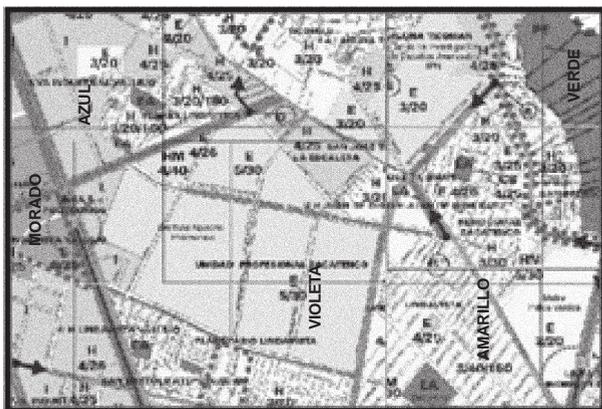


Fig. 12. Clasificación altimétrica en la GAM.



Fig. 13. Fotografía de enlace.

la distribución sobre una porción del mapa delegacional, específicamente la zona en donde se desarrolla el ejemplo actual.

El enlace propuesto comunica el edificio de la delegación G. A. Madero con el Planetario Luis Enrique Erro del Instituto Politécnico Nacional, unidad Zacatenco la figura 13 muestra una fotografía del enlace propuesto.

Los parámetros del enlace son:

1. coordenadas: Planetario 19°29'06.30" latitud norte y 99°07'23.75" longitud oeste, delegación GAM: 19°28'58.10" latitud norte y 99°06'48.59" longitud oeste
2. frecuencia de operación: 23GHz
3. potencia de transmisión: 2W
4. longitud del enlace 3.17 km.
5. ganancia de antenas $T_x = 20\text{dB} = G_{tx}$
6. ganancia de antena $R_x = 20\text{dB} = G_{rx}$
7. absorción atmosférica: 2 dB
8. pérdida de alimentación: 2 dB

Superponiendo los tres mapas georreferenciados, que se definen en la metodología de la sección anterior, se construyó el mapa general de elevaciones en el que se localizan los puntos del enlace, y el SIG proporciona los datos en cotas topográficas y alturas de edificios para generar el perfil de terreno. Se traza la línea del enlace punto a punto para obtener

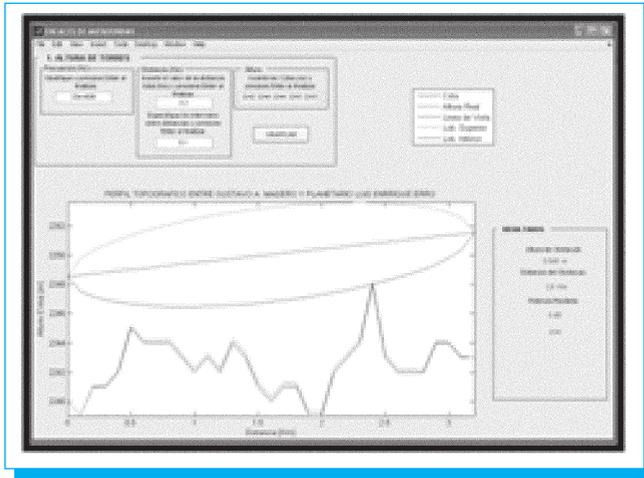


Fig. 14. Perfil de trayectoria.

los perfiles de trayectoria, con los que se construyen las gráficas de altura de obstáculos para definir la obstrucción o no de la primera zona de Fresnel mediante un programa de cómputo en MATLAB alimentado de la base de datos generada por el SIG, el programa calcula automáticamente los valores que se requieren de curvatura de la Tierra, primera zona de Fresnel y altura real, y se alimenta con información de frecuencia de operación, distancia y paso de muestreo de las cotas, la figura 14 muestra el perfil de trayectoria obtenido, se observa que el análisis del terreno garantiza la línea de vista entre los puntos de transmisión y recepción para una altura de torres de 9 m para ambos, librando la primera zona de Fresnel. Bajo estas condiciones se encuentra que la atenuación por trayectoria es de 130.85 dB, por lo que la potencia recibida en el receptor, considerando también la atenuación por espacio libre, es -90.13dB.

5. Conclusiones

Los modelos digitales de terreno son una herramienta muy útil en aplicaciones en las que se necesita conocer las características de la superficie terrestre. En aplicaciones de comunicaciones los mapas de altimetría del terreno permiten definir trayectorias que hagan viable un enlace radioeléctrico. Se debe considerar que en la superficie terrestre se encuentran obstáculos que no permiten una buena transmisión de las microondas, por lo que se deben tomar en cuenta la altura de

los obstáculos a superar. Si se desea garantizar la línea de vista entre dos puntos se necesita generar los perfiles topográficos necesarios y sobre ellos graficar líneas que describan curvatura de la Tierra y Zonas de Fresnel para conocer el tamaño y tipo de obstrucción a la que nos enfrentamos.

En este trabajo se ha presentado una metodología que permite hacer cálculos de enlace usando sistemas de información geográfica con los que se generan perfiles de terreno para definir su viabilidad, aunque en el ejemplo presentado es un enlace ficticio, se puede concluir a partir de él, la utilidad del procedimiento y por supuesto del uso de los SIG en el cálculo de enlaces de comunicaciones.

6. Referencias

- [1] Doyle, A.G y Clausen, F.L. (1978:1481). "Practical universal kriging and automatic contouring", *Geo-Procesing*, núm. 1, pp. 377-394.
- [2] Goly, N.(1988). "Spatial interpolation methods: a review", *The American Cartographer*, vol. 10, No. 2, pp. 99-113.
- [3] Fabiola Martínez Zúñiga, *Los sistemas de información geográfica aplicados en telecomunicaciones*, Tesis de maestría, Febrero 2008, Director de tesis: Dr. Jorge Sosa Pedroza.
- [4] Turner, A.K. "The role of three-dimensional Geographic Information Systems in subsurface characterization for telecommunications applications" at J. Raper: *Three-dimensional applications in Geographic Information Systems*, London, Taylor & Francis, pp115 - 128, 1989
- [5] Rhind, D., Green W, "Design of a Geographical Information System for a Heterogeneous Scientific Community", *International Journal of Geographical Information Systems*, No. 2, vol. 2 pp. 171-189, 1988.
- [6] Michael Gould, *Sistemas de Información Geográfica*. Editorial Síntesis (1994).
- [7] <http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>
- [8] Rappaport Theodore, *Wireless Communications*. Prentice Hall, USA, 1996.
- [9] http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/estados/df_geo.cfm
- [10] <http://www.setravi.df.gob.mx/transparencia/pdfs/gustavo.pdf>
- [11] <http://www.losmapas.com/>
- [12] <http://www.contraloriadf.gob.mx/prontuario/vigente/385.htm>

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Culhuacán,
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación:
- Doctorado en Comunicaciones y Electrónica

- Maestría en Microelectrónica
- Maestría en Sistemas Energéticos
- Especialidad en Seguridad Informática
y Tecnologías de la Información