5 GEOGRAFÍA PARA EL SIGLO XXI SERIE: LIBROS DE INVESTIGACIÓN

Conceptos de Geomática y estudios de caso en México

Raúl Aguirre Gómez
Coordinador

IG INSTITUTO DE GEOGRAFÍA UNAM

Conceptos de Geomática y estudios de caso en México

Raúl Aguirre Gómez
Coordinador

IG
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
U N A M

México, 2009

Conceptos de Geomática y estudios de caso en México
Primera edición, octubre de 2009

© D.R. Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geografía

Ciudad Universitaria,
Delegación Coyoacán,
C.P. 04510, México, D. F.
www.unam.mx
www.igeograf.unam.mx

Prohibida la reproducción parcial o total
por cualquier medio, sin autorización escrita
del titular de los derechos patrimoniales.

La presente publicación presenta los resultados de una
investigación científica y contó con dictámenes de
expertos externos, de acuerdo con las normas editoriales
del Instituto de Geografía.

Geografía para el siglo XXI (Obra general)
Serie Libros de Investigación
ISBN: 970-32-2976-X
ISBN: 978-607-02-0973-4

Impreso y hecho en México

Sumario

Introducción 9

Capítulo 1. Bases físicas de la Percepción Remota 15
Raúl Aguirre Gómez

Capítulo 2. Los Modelos Digitales de Terreno. Descripción e interpolación …61
Jean-François Parrot

Capítulo 3. Los sistemas de posicionamiento global (GPS) y su aplicación en Geomática. 87
Jorge Prado Molina

Capítulo 4. Definición y origen de los sistemas de información geográfica …115
José Antonio Quintero Pérez

Capítulo 5. Los sistemas de información geográfica en la prevención de desastres: realidad y perspectivas 149
Irasema Alcántara Ayala

Capítulo 6. Aplicación de las técnicas de Evaluación MultiCriterio en el ambiente SIG: el caso de la identificación de zonas para la reforestación del parque nacional Nevado de Toluca 165
Sergio Franco Maass

Capítulo 7. Análisis de cambio en la cobertura forestal en la Zona Núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, 2003-2006. 195
José López García

Capítulo 8. Estudio de cambio de uso del suelo como insumo al ordenamiento territorial de la Zona V Norte petrolera del estado de Chiapas 211
Gabriela Gómez Rodríguez y Omar Rojas García

Capítulo 9. Análisis satelital multitemporal de la vegetación 241
Lilia Manzo Delgado

Capítulo 10. Modelos Digitales de Terreno: atributos primarios y secundarios . 261
Verónica Ochoa Tejeda y Jean-François Parrot

Capítulo 11. Técnicas de análisis SIG como instrumento de toma de decisiones: diseño del plan maestro del Camino de la Virgen de Talpa 295
Ruth Miranda Guerrero, Jesús Rodríguez Rodríguez, María Isabel Ramírez Ramírez y Néstor Corona Morales

Capítulo 12. La producción pesquera en el Golfo de México y su relación con los procesos oceanográficos a partir de datos satelitales 315
Olivia Salmerón García

Capítulo 13. Metodología para determinar zonas de peligro al ataque de la plaga de langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons Walter*, *1870*) apoyados en sensores de alta resolución y SIG. Estudio de caso: la Huasteca Potosina, México. 331
María Guadalupe Galindo Mendoza, Carlos Contreras Servín y Luis Olvera Vargas

Introducción

Desde principios de la década de 1990 se ha venido observando un desarrollo paulatino y sin precedente en el análisis y el manejo de datos espaciales. Una de las razones fundamentales de este proceso es la afortunada unión entre las Ciencias de la Tierra y la Informática. Esta alianza de disciplinas se denomina Geomática.

La Geomática, a manera de definición, es un término científico moderno que sirve para expresar la integración sistémica de técnicas y metodologías de adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis, presentación y distribución de información geográficamente referenciada.

Estos datos espaciales provienen del análisis y de mediciones hechas con diversas técnicas empleadas en disciplinas tales como: la geodesia y la topografía, la cartografía, la teledetección o percepción remota, la fotogrametría, la geoestadística o análisis espacial, los Sistemas de Posicionamiento Global de Navegación por Satélite (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En la actualidad, la adquisición o levantamiento de datos se apoya en una amplia gama de instrumentos, técnicas y métodos matemáticos para realizar mediciones de objetos, en órdenes de magnitud que van desde posiciones puntuales muy localizadas hasta nuestro planeta en su totalidad. Una de las tecnologías modernas, ya incorporada en las actividades de levantamiento de datos, es el Sistema de Posicionamiento Global, el cual se ha convertido en una técnica de apoyo indispensable, cuando se requiere una localización precisa de los objetos.

Por otro lado, tecnologías como la Percepción Remota (PR) y la Fotogrametría, permiten inferir datos de un objeto o del ambiente físico sin estar en contacto directo con ellos y resultan de gran importancia cuando se requieren datos distribuidos sobre amplias zonas geográficas, incluyendo información tridimensional o modelos digitales de terreno. Los instrumentos que posibilitan estas formas de recopilar datos pueden estar montados en plataformas aéreas o satelitales.

Para el procesamiento y análisis de los datos recopilados mediante el empleo de una u otra técnica, se utilizan programas computacionales que incluyen procesadores de imágenes o SIG, los que además permiten realizar funciones de

simulación y modelado para crear escenarios posibles. Finalmente, los resultados obtenidos a través de todo este proceso se pueden presentar o desplegar gráficamente utilizando técnicas modernas de cartografía automatizada.

Este avance tecnológico ha permitido que en la actualidad la Geomática rebase el ámbito de las Ciencia de la Tierra y alcance a todas las ciencias que utilizan datos espacialmente referenciados. Así, existen hoy en día numerosos ejemplos donde la aplicación de las técnicas de Geomática ha resultado exitosa en áreas tan diversas como la Medicina humana y veterinaria, la Geología, la Arqueología, la Ingeniería Civil e Ingeniería Ambiental, y aun en los negocios de bienes raíces y comerciales, entre muchas otras.

Al presente, la mayoría de los países del mundo utiliza la Geomática en la solución de problemas que requieren de un análisis espacial y México no es la excepción. De esta manera, este libro surge de la necesidad de mostrar ejemplos relevantes del "quehacer geomático" que se está realizando en nuestro país por un conjunto de especialistas altamente capacitados en una o varias de las disciplinas constituyentes de la Geomática. Para lograr esto, se cuenta con la invaluable participación de investigadores de las siguientes instituciones: Universidad de Guadalajara, Universidad Autónoma del Estado de México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí y la Universidad Nacional Autónoma de México. El total de contribuciones, que involucró a veinte especialistas, permitió la conformación de trece capítulos.

Los temas presentados incluyen conceptos teóricos, propuestas metodológicas y aplicaciones de la Geomática en diversos tópicos. Aun cuando la gama de temas presentados es amplia, ha sido posible estructurar el libro en dos secciones: *a)* la primera sección incluye aspectos teóricos de percepción remota, modelos digitales de terreno, sistemas de posicionamiento global y sistemas de información geográfica; *b)* la segunda parte comprende aplicaciones de la Geomática que, por sus características, fueron subdivididas y ordenadas del siguiente modo: en primer lugar en estudios sobre recursos naturales, siguiendo con estudios de índole social y concluyendo con los de tipo económico.

En el primer capítulo Raúl Aguirre escribe sobre los aspectos teóricos de la PR e inicia con la definición de ésta y su historia. Posteriormente, aborda las bases físicas de la teledetección: desde la generación de energía electromagnética (EEM) por nuestro Sol, pasando por la interacción de la radiación solar con la atmósfera y los elementos de la superficie terrestre, hasta que la EEM logra alcanzar el instrumento o sensor montado en plataformas aéreas o satelitales.

En el segundo capítulo, Jean François Parrot escribe sobre los modelos de elevación del terreno y hace un tratamiento matemático del tema. Los Modelos

Digitales de Terreno (MDT) constituyen uno de los modelos de representación de la superficie terrestre, y proporcionan información métrica que puede ser integrada directamente en un SIG. El autor maneja los conceptos con claridad y coherencia, de tal suerte que el lector poco acostumbrado a este tipo de lenguaje será capaz de seguir la secuencia y "ver las entrañas" de un tema complejo e interesante.

El capítulo de Jorge Prado proporciona una excelente base para entender el funcionamiento de los GPS y presenta los aspectos históricos y las circunstancias que dieron lugar a la creación de este tipo de sistemas explicando, de manera breve, algunos métodos de navegación, desde puntos de referencia en el terreno o en las estrellas hasta llegar a las constelaciones de satélites GPS-NAVSTAR. Finalmente, explica los aspectos técnicos de los GPS, los cuales son de gran importancia para obtener el mayor provecho de estos formidables instrumentos, para navegar de manera segura por nuestro planeta.

En el capítulo relativo a los SIG, José Quintero ofrece un magnífico relato histórico del origen de éstos desde antes que las civilizaciones antiguas implementaran la escritura hasta finales del siglo XX. Inicia su investigación en el ámbito mundial con una breve historia que va desde los primeros mapas hasta llegar al origen de los SIG, con el desarrollo de la computación. Finalmente, aborda el tema SIG en nuestro país, haciendo un recuento de hechos tecnológicos y sus transformaciones. El estudio abarca desde la época precortesiana, donde logra hacer pasar códices indígenas a través de un tamiz geográfico, hasta fechas recientes, terminando con algunos comentarios entorno al origen, evolución y uso de los SIG.

En el último capítulo de la parte teórica, Irasema Alcántara proporciona una visión interesante de la aplicación de los SIG al estudio de las amenazas y riesgos de índole natural: vulcanismo, sismos, tsunamis y la vulnerabilidad de la población ante este tipo de eventos. Se ejemplifican diversos eventos que han tenido resonancia mundial, mostrando el potencial de la aplicación de los SIG en estudios de amenazas y riesgos, y que pueden considerarse estratégicos en el ámbito de la prevención de desastres.

En el primer capítulo de aplicaciones de la Geomática al estudio de recursos naturales, Sergio Franco presenta un estudio sobre la Evaluación Multi-Criterio (EMC). Inicia con una revisión general de la aplicación de esta poderosa herramienta en el ambiente de los SIG; posteriormente, hace un análisis de la aplicación de la EMC para la zonificación del Parque Nacional Nevado de Toluca con el importante objetivo de alcanzar la reintroducción de especies forestales nativas como son el pino, el oyamel, el aile y el encino.

El capítulo de José López incide en la problemática de la conservación de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, la cual sirve no sólo como albergue durante la hibernación de estos insectos sino que constituye, además, una importante zona de recarga de acuíferos donde se protege una de las regiones boscosas mejor conservadas de México. Su estudio se basa en el análisis de fotografías áreas digitales y en la fotointerpretación comparativa de los periodos 2003-2005 y 2005-2006 y en el procesamiento de esta información en un ambiente SIG.

Por su parte, Gabriela Gómez y Omar Rojas presentan un interesante estudio de ordenamiento territorial en la Zona V Norte Petrolera de Chiapas. Su análisis se basa en la detección de cambios en la cobertura vegetal y en el uso del suelo mediante la utilización de imágenes de satélite LandSat TM y ETM+, trabajo de campo e información de respaldo. Logran la detección de estos cambios comparando mapas de vegetación y de índices derivados (NDVI) de los años 1986 y 2002.

En este mismo orden de ideas, pero desde un punto de vista regional, Lilia Manzo presenta un capítulo dedicado al análisis satelital multitemporal de la vegetación en un área de la región central de México. Hace una investigación regional y multitemporal del índice de vegetación NDVI obtenido de las imágenes NOAA-AVHRR, observando el patrón fenológico interanual de la vegetación y la influencia del fenómeno ENOS de 1997-1998 en los valores extremos de este índice.

En el siguiente capítulo, Verónica Ochoa y Jean François Parrot presentan una aplicación de los modelos digitales de terreno en la Sierra Norte de Puebla. El tratamiento del tema posee una fuerte base matemática para entender los algoritmos que permiten la extracción de atributos, primarios y secundarios, que describen los rasgos morfológicos de la región. Así, analizan parámetros primarios como: sombra, iluminación, pendiente u orientación, mientras que con los atributos secundarios consideran temas como la vulnerabilidad, los procesos de erosión, la humedad de los suelos y la dirección de los flujos, entre otros.

La sección de aplicaciones sociales y urbanas inicia con el trabajo de Ruth Miranda y colaboradores, quienes presentan un elegante ejemplo de integración Geomática (SIG, GPS y Cartografía) para la creación de un plan maestro del Camino de la Virgen del Rosario de Talpa, con el objetivo de generar un modelo territorial, en ambiente SIG, que facilite el abastecimiento de equipamientos básicos, para aminorar las duras condiciones inherentes al peregrinaje. Al ser México un país profundamente religioso y con una gran tradición en peregrinaciones, esta excelente aproximación resulta, por demás, pertinente.

La aplicación de la Geomática a elementos de índole económica comienza con el capítulo de Olivia Salmerón. Su contribución es una investigación híbrida donde analiza la producción pesquera en el Golfo de México utilizando imágenes satelitales. En su investigación emplea diversos anuarios estadísticos de pesca e imágenes satelitales sobre la variabilidad de la temperatura superficial del mar (procesos físicos) y cambios en la concentración de la clorofila-*a* (procesos biológicos). En su estudio logra establecer una relación entre la época del año de mayor producción pesquera con las condiciones oceanográficas imperantes.

Por su parte, Guadalupe Galindo y colaboradores, analizan la perenne problemática del agro mexicano. Su estudio se enfoca al análisis del efecto de las plagas en las actividades agropecuarias de la región de la Huasteca Potosina. Los autores plantean la necesidad de un monitoreo constante de las plagas y de las condiciones que propician su desarrollo (deforestación, variabilidad térmica y pluvial, y el inadecuado uso de suelo), mediante el uso integral de elementos geomáticos: SIG, MDT, cartografía, GPS e imágenes satelitales.

Por último, quisiera agradecer la contribución de todos los autores para hacer viable la creación de esta obra y por haber hallado el tiempo para dedicarlo a esta publicación; sin ellos no hubiera sido posible. Quisiera mencionar, y agradecer también, el importante aporte del Dr. Adrián Guillermo Aguilar, quien propuso la idea de este libro y planteó el reto de coordinarlo, sugirió el nombre de posibles colaboradores y me dio consejos para llevar a buen término este proyecto. Vaya también un agradecimiento a la Dra. Irasema Alcántara Ayala, tanto por su participación como autora en uno de los capítulos que integran este libro, como por el apoyo e impulso final para lograr esta obra, en su papel de actual directora del Instituto de Geografía de la UNAM. Gracias también a la coordinación editorial de la UNAM y del Instituto de Geografía, en particular, por el apoyo para la publicación de esta obra. Finalmente, deseo manifestar mi reconocimiento al gran trabajo, profesional y a conciencia, desarrollado por el conjunto de árbitros anónimos que ayudaron a enriquecer esta obra con sus comentarios, sugerencias y análisis crítico.

Raúl Aguirre Gómez,
mayo de 2008

Capítulo 1. Bases físicas de la Percepción Remota

Raúl Aguirre Gómez
Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE),
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar los conceptos básicos de la percepción remota (PR) o teledetección, desde el punto de vista físico. Con esto se pretende que el lector adquiera la perspectiva general de esta técnica, conozca sus fundamentos, y comprenda porqué en las últimas décadas tiene una amplia utilidad en diversas disciplinas científicas.

El capítulo cuenta con tres secciones, divididas, de manera esquemática, desde la definición de PR, su historia, pasando por la generación de EEM por nuestra estrella más cercana hasta alcanzar el instrumento o sensor. La primera sección consiste en la definición de percepción remota y un breve resumen histórico. En el segundo apartado se describen los conceptos básicos de la PR. Se inicia con las características de la fuente de radiación electromagnética (REM), natural y artificial, y las características del espectro electromagnético. Posteriormente se describe la interacción de la REM con la atmósfera, lo cual nos introduce al concepto de ventanas atmosféricas; la interacción con los elementos de la superficie terrestre, ya sea vegetación, agua, suelo, nubes o nieve, lo cual nos introduce al concepto de firmas espectrales, y esta sección finaliza con un recuento de los diferentes sensores utilizados, desde diferentes plataformas, en diferentes regiones del espectro electromagnético: visible, infrarrojo o microondas. En la última sección se mencionan algunas de las aplicaciones científicas más importantes de la percepción remota, de acuerdo con cada una de las regiones del espectro electromagnético y al tipo de sensor utilizado.

Definición

La percepción remota o teledetección se define como la ciencia o arte de adquirir información de un objeto, sin estar en contacto directo con él (Lindenlaub, 1976). Esta es una definición bastante amplia, que da cabida a la observación y análisis realizados a través de instrumentos como telescopios y microscopios. De acuerdo con esta definición pueden entrar los seres vivos, en general, y el ser humano, en particular, al poseer "sensores" que detecten energía electromagnética, en diferentes intervalos. Por ejemplo, nuestros ojos son capaces de detectar la radiación "visible" del espectro electromagnético; nuestros oídos son capaces de percibir frecuencias en el intervalo sónico comprendido entre los 30 y 25 000 Hertz, aproximadamente; nuestra piel puede apreciar cambios de temperatura o energía térmica, etc. Sin embargo, aunque formalmente cierto, estos ejemplos no son lo que se entiende en la práctica por PR. Cracknell (1981) concluye que la percepción remota es una materia notoriamente difícil de definir de manera satisfactoria. En consecuencia, es necesario entonces acotar la definición dependiendo del ámbito de interés. Con el fin de adecuar la definición dada al inicio, con la idea intuitiva que se tiene de PR, se pueden imponer algunas consideraciones. La primera es considerar que el objeto de estudio está sobre, o muy cercano, a la superficie de la Tierra y que el sensor se encuentra por encima del objeto y a una distancia "substancial" de éste. Una segunda restricción es que la información que llegue al sensor sea transportada por radiación electromagnética y que algunas propiedades de ésta sean afectadas por el objeto percibido remotamente. Esta definición excluye, en consecuencia, algunas técnicas de medición en estudios geofísicos como las mediciones sísmicas y geomagnéticas, la toma de imágenes para uso médico, entre otras, pero nos constriñe a observaciones hechas desde plataformas aéreas y satelitales y realizadas con sensores capaces de detectar la radiación electromagnética.

Historia de la percepción remota satelital

En esta sección se presenta, de manera breve y sinóptica, la historia de la PR, desde los años cuarenta hasta nuestros días. Obviamente, la historia de la PR, en general, puede remontarse hasta la época de la Grecia Clásica, pero para los fines de este capítulo se considerará únicamente la época señalada. En particular, se reseñan los aspectos históricos del desarrollo satelital ligado a tres disciplinas: meteorológicos, de prospección de recursos naturales y radar satelital.

Satélites meteorológicos. A finales de la década de los años cuarenta se lanzaron cohetes en vuelos suborbitales, equipados con cámaras. Así, a principios de los años cincuenta, las fotografías obtenidas mediante estos sistemas dieron lugar a serias discusiones científicas sobre la posibilidad de observar el estado del "tiempo" desde el espacio. Varios grupos, principalmente la armada de los Estados Unidos y la Universidad de Wisconsin, persiguieron la idea de utilizar un satélite con fines meteorológicos. Estos esfuerzos se intensificaron después del lanzamiento del Sputnik-1 por la Unión Soviética, el 4 de octubre de 1957. El primer satélite norteamericano, el Explorer-1 fue lanzado 123 días después, el 31 de enero de 1958.

De importancia fundamental a los vuelos espaciales en general y a la meteorología satelital en particular, fue la formación de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) el 1 de octubre de 1958. Por casi medio siglo la NASA ha sido líder en el desarrollo de todo tipo de satélites científicos usados con fines civiles. Diversas agencias estuvieron involucradas desde un principio en la meteorología satelital y las cuales ahora forman parte de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), en particular el actual Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos. Hoy en día, todos los satélites meteorológicos de los Estados Unidos son controlados por la NOAA.

El primer satélite con un instrumento meteorológico fue el Vanguard-2 lanzado el 17 de febrero de 1959, desarrollado por el Laboratorio Evans Signal de la Armada norteamericana. El Vanguard-2 portaba un par de fotoceldas colocadas detrás de unas lentes, muy parecido a los radiómetros de barrido actuales, que supuestamente debían formar una imagen visible de la Tierra conforme el satélite orbitara y girara. Lamentablemente el satélite vibraba sobre su eje causando que las líneas de barrido se entrecruzaran, lo cual hacía que los datos fueran inutilizables.

El Explorer-6, lanzado el 7 de agosto de 1959, fue el segundo satélite con instrumentos meteorológicos. Transportaba un sistema productor de imágenes y un radiómetro Suomi. El satélite entró en una órbita demasiado elíptica y fue esencialmente inútil; sin embargo, uno de sus logros fue el envío de una de las primeras fotografías de la Tierra.

El primer instrumento meteorológico exitoso en un satélite en órbita fue el radiómetro Suomi transportado en el Explorer-7, el cual fue puesto en órbita el 13 de octubre de 1959. Este instrumento, desarrollado por Verner Suomi de la Universidad de Wisconsin, constaba de hemisferios pintados de blanco o negro, soportado por espejos de aluminio y montado en el ecuador del satélite giratorio. Los espejos reflejaban la escena hacia los hemisferios, de manera que éstos actuaban como esferas aisladas en el espacio. Dado que el satélite giraba, las esferas

hacían un muestreo de la radiación solar y de la radiación terrestre independiente de la orientación del eje de giro del satélite. La temperatura de cada hemisferio era monitoreada y su tasa de cambio temporal se relacionaba con la ganancia o pérdida neta de energía radiativa en el sensor. Los hemisferios negros absorbían toda la radiación; los hemisferios blancos reflejaban la radiación solar pero absorbían radiación infrarroja. La diferencia entre el balance de radiación de los hemisferios indicaba la radiación solar. Con estos datos se crearon los primeros mapas, si bien burdos, de la radiación solar reflejada por la Tierra y de la radiación infrarroja emitida por el planeta.

El primer satélite dedicado exclusivamente a la meteorología satelital fue lanzado el 1 de abril de 1960. El TIROS-1 (Television and Infrared Observational Satellite) fue el vigésimo segundo satélite exitosamente lanzado al espacio.

El instrumento productor de imágenes en el satélite TIROS-1 era una cámara vidicon, la cual tenía una adaptación de una cámara de televisión estándar. Esencialmente, una lente enfocaba la imagen sobre la cara sensible a la luz de un tubo de rayos catódicos (CRT, por sus siglas en inglés) de 12.7 mm^2. Las áreas brillantes y obscuras de la imagen generaban un patrón de cargas eléctricas sobre la pantalla CRT. Un haz de electrones barría la cara del CRT para medir la carga. El barrido era similar al de una televisión normal: tenía 500 líneas con 500 elementos cada una. El barrido de una imagen completa tomaba dos segundos. Los voltajes medidos por la cámara vidicon eran enviados por telemetría a una estación terrena para integrarse en una imagen.

Aunque burdas, comparadas con las actuales, las imágenes producidas por el TIROS-1 causaron gran entusiasmo. Por primera vez se podía observar la Tierra en su totalidad. No solamente los satélites de observación han llegado a ser esenciales en la meteorología, es muy probable que hayan cambiado de manera fundamental nuestra forma de percibir el planeta, de ser un conjunto lejano de continentes aislados a un sistema integral, de tierra, océano, atmósfera y seres vivientes. Aproximadamente 23 000 imágenes fueron tomadas y enviadas en los 79 días de vida del TIROS-1.

Nueve satélites adicionales de la serie TIROS fueron puestos en órbita; el último, el TIROS-10, fue lanzado el 2 de julio de 1965. El satélite TIROS-2 poseía un radiómetro de barrido, el Radiómetro Infrarrojo de Media Resolución (MRIR, por sus siglas en inglés), el cual era similar a los instrumentos de imágenes actuales. Los primeros cuatro TIROS fueron lanzados en una órbita con 48° de inclinación. A partir del TIROS-5, la inclinación de la órbita de estos satélites fue de 58°, con el fin de expandir la cobertura 10° extra hacia los polos.

El TIROS-8, lanzado el 21 de diciembre de 1963, introdujo la Transmisión Automática de Imágenes (APT, por sus siglas en inglés). Una nueva cámara vidicon con 800 líneas de resolución fue ajustada a una tasa lenta de cuatro líneas por segundo, y los datos fueron inmediatamente transmitidos a la Tierra. Esta tasa de transmisión lenta permitió que pudieran utilizarse equipos económicos en la recepción de las imágenes. De esta manera, muchos países pudieron recibir directamente imágenes de satélite con el propósito de predecir el tiempo. La APT es, todavía, una función importante en los satélites de órbita polar actuales.

Para mantener su orientación en el espacio, muchos satélites giran. En ausencia de torques externas, el momento angular se conserva y el eje de giro apunta a una dirección fija en el espacio conforme el satélite orbita la Tierra. Los TIROS giraban aproximadamente a 12 revoluciones por minuto; sin embargo, esto creó un problema con los primeros ocho satélites de la serie. Las cámaras vidicon en estos satélites estaban colocadas en la parte baja de la nave, es decir, apuntaban paralelamente al eje de giro y, por consiguiente, a una dirección constante en el espacio. La Tierra estaba en su campo de visión alrededor de un 25% del tiempo. El 75% de tiempo restante de cada órbita, los satélites veían el espacio. El TIROS-9, lanzado el 22 de enero de 1965, poseía una nueva configuración, conocida como "rueda de carro". El eje de giro del satélite era ahora perpendicular al plano orbital, y las cámaras fueron re-orientadas para apuntar a los lados de la nave. De esta forma el satélite daba vueltas justamente como una rueda de carro en su órbita alrededor del planeta. En cada rotación del satélite, las cámaras apuntaban hacia la Tierra y tomaban una imagen. Esto permitió hacer compuestos globales con las imágenes así obtenidas.

En 1964 dio inicio una serie, de gran importancia, de satélites meteorológicos experimentales, la llamada serie NIMBUS. El NIMBUS-1 fue lanzado el 28 de agosto de 1964 y fue notable por dos causas: fue el primer satélite meteorológico estabilizado con tres ejes; esto es, con el uso de las ruedas de *momentum* (ruedas de vuelo dentro de la nave) controladas por sensores de horizonte, rotaba una vez por órbita colocando una torque en la rueda de *momentum* apropiada, de tal suerte que su instrumento apuntaba constantemente hacia la Tierra. Su cámara APT era, por consiguiente, mucho más útil que la del TIROS-8, la cual sólo veía el planeta un 25% de tiempo. Desde esa época, los satélites meteorológicos han tenido importantes mejoras técnicas en su funcionamiento y en la forma de obtener información. Sin embargo, las bases de su funcionamiento son las mencionadas previamente.

Satélites para la prospección de recursos naturales. La década de los años setenta marca el inicio de la Era del mapeo para uso civil desde satélites. Esta época

se caracterizó por la proliferación de aplicaciones civiles en la observación del planeta. Esta situación dio origen al surgimiento de una serie de programas científicos con financiamiento gubernamental. En 1972 se lanza al espacio el ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), siendo el primer satélite para la prospección de recursos naturales. Este sistema fue renombrado posteriormente como LandSat-1, el cual es un acrónimo de su aplicación (*land*: tierra y *sat*: satélite). Esta plataforma transportaba un sensor similar a una cámara de televisión llamado RBV (Return Beam Vidicon); y un barredor multiespectral MSS (Multiespectral Scanner). Ese mismo año se obtuvo una serie de fotografías tomadas desde el Skylab. Esta fue la primera estación espacial norteamericana, y fue usada para producir mapas de uso del suelo, utilizando fotografías en formato de 35 y 70 mm.

Otros años importantes en esta década fueron: 1975, cuando se puso en órbita el LandSat 2; 1978 se da el lanzamiento del LandSat 3. Este tipo de satélites fue de gran utilidad en aplicaciones terrestres.

Los satélites meteorológicos TIROS y Nimbus observaban los procesos atmosféricos, pero el estudio satelital de la parte marina del planeta no había sido concretado. Para cubrir este aspecto, en 1978 se puso en órbita la contraparte del programa LandSat, y el satélite SeaSat es puesto en órbita (*sea*: mar; *sat*: satélite), siendo el primer satélite civil en utilizar un radar de apertura sintética. Esto le permitiría obtener mediciones de oleaje, viento, entre otros parámetros de interés oceanográfico. Desafortunadamente, a los pocos meses de su lanzamiento se presentó una falla irreparable en el funcionamiento del sensor del SeaSat y la obtención de datos marinos en la región de las microondas tuvo que esperar alrededor de diez años más. No obstante, ese mismo año se puso en órbita el satélite Nimbus 7, el cual contaba con un sensor, diseñado como "prueba de concepto", para observar la presencia de clorofila en los mares del planeta. El sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) fue creado para observar, como su nombre lo indica, principalmente las regiones costeras y oceánicas; sin embargo, con el paso del tiempo se observó su incapacidad para observar las costas, aunque dio excelentes resultados, por casi una década, de las regiones oceánicas.

En 1982, el lanzamiento del satélite LandSat 4 se caracterizó por dos situaciones importantes. Primero, en el aspecto técnico, el satélite transportaba dos sensores: el MSS, presente en las versiones anteriores y una versión mejorada y actualizada de éste, el llamado Mapeador Temático (TM, por sus siglas en inglés). Este sensor poseía una mejoría en las resoluciones espectral (más bandas), espacial (mejor resolución de terreno) y radiométrica (más niveles de discriminación). La segunda característica importante fue la transferencia de la franquicia de la NASA a una empresa privada, lo que da inicio a la era de la comercialización de

este tipo de información. Dado el éxito que se alcanzó con este proyecto, en 1984 se realizó el lanzamiento del LandSat-5, satélite que hasta la fecha sigue activo (Figura 1).

Europa, por su parte, avanzó también en la investigación satelital y en 1986 el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES, por sus siglas en francés) puso en órbita el satélite SPOT-1 (Systeme Probatorie de la Observation de la Terre), diseñado también para la prospección de recursos naturales. La información proporcionada por el satélite SPOT es de gran calidad y aun cuando posee menos bandas espectrales que el LandSat, su resolución espacial es mucho mejor (píxeles de 20 m o menos). El éxito del proyecto fue tal que en 1990 y en 1993 tienen lugar los lanzamientos del SPOT-2 y del SPOT-3, respectivamente.

La serie LandSat continúa en proceso y en 1994 se proyecta el lanzamiento del satélite LandSat-6. Desafortunadamente la plataforma presentó fallas técnicas severas en el lanzamiento y no logró entrar en órbita.

Ante las mejoras tecnológicas, cada vez más rápidas, la información confidencial tomada por los satélites espías de los años sesenta, resulta ser anticuada y obsoleta. Es por ello que, por órdenes de la administración del presidente

Figura 1. Imagen LandSat TM del norte de la cuenca de México.

W. Clinton el 23 de febrero de 1995, los primeros datos de los satélites de inteligencia KH son desclasificados. La información desclasificada es la de las plataformas CORONA, ARGON, LANYARD. Esto no significa el fin de los satélites espías, dado que ese mismo año la prensa informa que hay indicios de que una nueva clase de satélites de inteligencia está iniciándose. Se informa que el nuevo código satelital, llamado 8X, es una actualización del satélite espía KH-12. Así, el 28 de septiembre de ese año, *Los Angeles Times* declara que la actual generación de satélites fotográficos captará áreas de alrededor de 400 km^2, mostrando detalles de alrededor de 15 cm.

Por otro lado, la comunidad oceanográfica mundial había obtenido información muy valiosa del sensor CZCS sobre el color del mar en áreas oceánicas, pero tuvo que esperar más de diez años a que hubiera un sensor dedicado a esta tarea. Finalmente, a mediados de 1997 tuvo lugar el lanzamiento del satélite OrbView el cual transporta al sensor Sea Wide Field of View Sensor (SeaWiFS).

En los últimos años ha sido puesta en órbita una serie de satélites cuya sofisticación los ha hecho imprescindibles. En 1998 se puso en órbita el SPOT 4 con un sensor más fino llamado "vegetation". La serie LandSat se actualiza con la puesta en órbita del satélite LandSat 7 con el sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper), en 1999. Ese mismo año ocurren el Lanzamiento del satélite IKONOS, el cual es el primer sistema comercial con 1-metro de resolución espacial y el de la serie EOS AM-1 o Terra. Con esta misma perspectiva, en 2001 ocurre el lanzamiento del satélite Digitalglobe Quickbird, el cual es un sistema comercial de la clase submetro, con 61 cm de resolución. Ese mismo año son desclasificados los LandSat 4 y LandSat 5, y tiene lugar el lanzamiento del Jason-1. Al año siguiente (2002) tiene lugar el lanzamiento de una serie de satélites que transportan sensores altamente sofisticados, como son: Aqua-MODIS, SPOT-5, ENVISAT, METSAT, Alsat-1, Meteosat Second Generation (MSG-1), ADEOS-II, posteriormente, en 2003 se lanzan el ICESat y el Orbview-3 con 1 m de resolución.

RADAR satelital. La era de la teledetección utilizando RADAR dio inicio en los años setenta, con un proyecto denominado RADAM, el cual es un acrónimo de RADAR del Amazonas. La cartografía del valle amazónico había representado una tarea imposible de realizar en esos años. Esto debido, por un lado, a la inaccesibilidad a la zona selvática e inhóspita por tierra y, por otro lado, a la constante cobertura nubosa y la perenne cubierta vegetal que hacían imposible la visibilidad desde el aire o el espacio. La observación desde el aire utilizando radares planteaba, por primera vez en la historia, la posibilidad de observar esta región.

La región de las microondas del EEM utilizada por los radares puede penetrar la cobertura nubosa al ser ésta transparente a esta parte del espectro. El proyecto RADAM fue exitoso y permitió tener una visión de la región del Amazonas

y observar los cauces y los tributarios del río en este valle fluvial. En la actualidad este proyecto continúa vigente y el monitoreo tiene lugar con sensores más sofisticados como el satélite japonés JERS-1. El radar de visión lateral fue otro medio de observación aérea que permitió conocer diferentes regiones del planeta desde un punto de vista diferente y hasta entonces desconocido.

La invención del radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés) permitió hacer observaciones prolongadas en la región de las microondas. Esto fue posible mediante el diseño de una antena de RADAR corta y el aprovechamiento del efecto Doppler, para tener el mismo resultado que si se empleara una antena larga y difícilmente manejable.

Como se mencionó previamente, el satélite SeaSat empleó también sensores de RADAR en la observación de la superficie marina, aunque por un corto periodo.

En 1981 tuvo lugar el lanzamiento del satélite SIR-A (Space Imaging Radar), el cual proporcionó magníficas imágenes de RADAR desde el espacio. Hacia 1984 se puso en órbita el satélite SIR-B, el cual era una versión mejorada de su predecesor y, finalmente, a principios de la década de los años noventa, se puso en órbita el SIR-C.

En 1991, la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) realizó el lanzamiento del ERS-1 (European Radar Satellite), este fue el primer satélite lanzado con un altímetro, el cual puede mapear la superficie terrestre con resolución espacial de cinco centímetros. En 1995 se da el lanzamiento del ERS-2, que viene a ser el complemento del ERS-1.

Los aspectos bélicos no son ajenos a la aplicación de la técnica de radar satelital. Como ejemplo de esto, los Estados Unidos emplean imágenes satelitales en general y de Radar en particular para hacer observaciones aéreas a Irak en la Guerra del Golfo en 1991. Esto atrae la atención del público gracias al reconocimiento aéreo, al mapeo y a la capacidad de los satélites espías.

Satélites asiáticos. Si bien el desarrollo de la investigación satelital ha tenido contribuciones importantes por los Estados Unidos y los países europeos, otros países, en particular la India y Japón, han participado de manera significativa en el avance tecnológico y científico de la PR, con la creación de nuevos satélites. En los párrafos siguientes se presenta una semblanza del desarrollo de la investigación satelital en estos países.

Satélites de la India. En junio de 1972 el gobierno de la India instituyó una Comisión Espacial y un departamento del Espacio (DOS, por sus siglas en inglés). Bajo la supervisión del DOS, la Organización de la India para la Investigación del Espacio (ISRO, por sus siglas en inglés) ha desarrollado programas espaciales a través de centros distribuidos en diferentes lugares de la India. Así, el 19 de abril de 1975 la India lanzó su primer satélite experimental llamado Aryabhata en

honor de un matemático indio del siglo V. Este programa tenía los objetivos de diseñar y fabricar un sistema satelital y evaluar su desempeño en órbita y desarrollar una metodología para conducir una serie de operaciones complejas en sus fases orbitales. Este ejercicio también proporcionaría una oportunidad para conducir investigaciones en el área de las ciencias espaciales. El satélite transportaba tres experimentos: astronomía en rayos-X, física solar y Aeronomía. Debido a una falla en uno de los transformadores dejó de funcionar en cuatro días. Posteriormente, el 19 de junio de 1981, sería lanzado el satélite Apple (Arianne Passenger Payload Experiment) desde Kourou, Guayana francesa, en una órbita geoestacionaria a 102° E. Este fue el primer satélite de comunicación geoestacionario, y fue lanzado junto con el Meteosat 2 de la Agencia Espacial Europea (ESA). Este programa fue desactivado en septiembre de 1983.

Otro satélite de importancia fue el Bhaskara, bautizado así en honor de un astrónomo indio del siglo VII. Se construyeron dos satélites utilizando este nombre: Bhaskara 1 y el Bhaskara 2. El Bhaskara 1 fue puesto en órbita el 7 de junio de 1979, desde el cosmodromo de Kapustin Yar, en Rusia, a bordo del vehículo de lanzamiento Intercosmos. El satélite constaba de cámaras de televisión y radiómetros de microondas, y tenía como objetivo el estudio de los recursos de la India por un año. Se recibieron datos útiles del océano y tierra durante un periodo pero, posteriormente, las cámaras fallaron. La telemetría local fue recibida hasta su reingreso el 17 de febrero de 1989. El Bhaskara 2 fue lanzado el 20 de noviembre de 1981 desde el mismo sitio y fue declarado operacional después de la recepción de 300 imágenes de televisión en la India. La telemetría local fue recibida hasta el reingreso del satélite al planeta el 30 de noviembre de 1991.

Actualmente la India desarrolla programas nacionales dedicados a la observación de la Tierra. El primero de ellos es el INSAT (Indian National Satellite System). Una de las características principales del sistema INSAT es que únicamente ha utilizado plataformas geoestacionarias para comunicaciones domésticas simultáneas y funciones de observación de la Tierra. Las primeras cuatro generaciones de la serie INSAT (INSAT-1A, -1B, -1C e -1D) fueron construidas en los Estados Unidos y lanzados tanto por cohetes estadounidenses o por vehículos de lanzamiento de la Agencia Espacial Europea. La serie INSAT 2 fue aprobada en abril de 1985, con lanzamientos en 1992-1993 desde el Arianne, en la Guyana Francesa, seguido por tres satélites operacionales más en 1994-1995 a bordo de vehículos equipados. El número total de satélites lanzados en la serie del INSAT-2 fue de 4 (INSAT-2A, -2B, -2C y -2E), el satélite INSAT-2D fue vendido a la agencia ARABSAT de los países árabes y lanzado el 4 junio de 1997. El INSAT-2E fue puesto en órbita el 3 de abril de 1999. Posterior a este último lanzamiento de INSAT-2,

dio inicio la nueva serie INSAT-3. Cinco satélites de esta nueva generación fueron planeados a partir de 1999 y lanzados entre 2000 y 2003. Los últimos tres satélites de esta serie fueron lanzados por el GSLV (Geosynchronous Satellite Launch Vehicle) en Sriharikota, India. Para ello, el INSAT solicitó 29 nuevas locaciones geoestacionarias en 1997; desde 51.5° E a 113.5° E y desde 13° W y 108° W.

Otro programa de investigación satelital indio es el IRS (Indian Remote Sensing Satellite) dedicado a la percepción remota. El IRS es un programa creado para desarrollar una capacidad autóctona en la captura de imágenes del planeta, particularmente de la India. Estos satélites poseen una órbita polar heliosincrónica promedio a 618 km de la Tierra. Su misión es la exploración de agua superficial, uso del suelo, cartografía de inundaciones y bosques, inventario de agua superficial. El primer satélite de la serie (IRS-1A) fue lanzado por el vehículo soviético Vostok. Desde diciembre de 1987, siete satélites de la familia IRS han sido lanzados: IRS-1A, -IB, -1E, -P2, -1C, -P3, -1D (en orden de lanzamiento). Dos satélites más fueron lanzados antes del 2000, uno de ellos fue el IRS-P4, el cual fue lanzado a principios de 1998 y el IRS-P5 en 1999. El IRS-P4 llamado también OceanSat-1, tiene un radiómetro de barrido de multi-frecuencia y un monitor de color del océano de nueve bandas (OCM). Posee una resolución especial de 250 m al nadir y un ancho de barrido de 1 500 km con una resolución temporal de dos días. La principal aplicación de este satélite es obtener información relacionada con el vapor de agua y llevar a cabo el monitoreo del color del océano. Este seguimiento permite registrar las concentraciones de clorofila en el océano, lo cual es útil para predecir la productividad biológica de los mares. Asimismo, es de utilidad en el análisis de procesos costeros tales como dinámica de sedimentos, dinámica de estuarios, patrones de circulación y dispersión, surgencias costeras, frentes oceánicos y estudios de arrecifes coralinos. Por consiguiente, el satélite es de utilidad en estudios ambientales para el apoyo del análisis de la contaminación marina, derrame de hidrocarburos.

El IRS-P5, también conocido como CartoSat, fue concebido para aplicaciones cartográficas, por lo que es útil para la creación de mapas y modelos de terreno. El satélite más reciente de la serie es el IRS-P6, también conocido como Resourcesat-1, lanzado en octubre de 2003 a bordo de la plataforma PSLV-C6 (Polar Satellite Launch Vehicle). De los 12 satélites de percepción remota enviados por ISRO hasta la fecha, el Resourcesat-1 es el más sofisticado y el más pesado. El satélite posee sensores tales como: *a)* un barredor lineal de auto-imagen de alta resolución (LISS-4, por sus siglas en inglés) que opera en tres bandas espectrales en el visible e infrarrojo cercano con una resolución espacial de 5.8 m; *b)* un sensor de media resolución LISS-3 que funciona en tres bandas del infrarrojo cercano y

una en la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR) con 23.5 m de resolución espacial y *c)* un sensor avanzado de campo amplio (AWiFS) que opera en tres bandas espectrales del infrarrojo cercano y una banda en el SWIR con 56 m de resolución espacial.

Satélites japoneses. Los estudios espaciales de Japón estuvieron a cargo de tres organizaciones: la NASDA (National Space Development Agency of Japan); el ISAS (Institute of Space and Astronautical Science), y el NAL (National Aerospace Laboratory of Japan). A partir del 1 de octubre de 2003 se conformó la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), la cual es el resultado de la integración de estas tres organizaciones espaciales japonesas. Una de las misiones espacial más importantes de Japón fue la puesta en órbita del satélite ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite)/Midori, la cual contó con cooperación internacional. El objetivo general de la misión era la investigación ambiental del planeta, esto es, la observación integrada de parámetros geofísicos, la observación global del suelo, y procesos oceánicos y atmosféricos (color del mar y temperatura superficial). Adicionalmente, se diseñaron satélites de comunicación en enlaces inter-orbitales llamados IOCS (Inter-Orbital Communication Subsystem).

La plataforma ADEOS fue desarrollada por la Mitsubishi Electric Corporation, de Tokio, con la colaboración de las corporaciones NEC y Toshiba. Este satélite tenía una órbita polar helio-sincrónica; con una distancia en apogeo de 804.6 km y una distancia en perigeo de 789.0 km; su periodo orbital era de 100.8 min, con una hora de órbita solar local a las 10:30 AM en nodo descendente.

El lanzamiento del ADEOS tuvo lugar el 17 de agosto de 1996 mediante el vehículo de lanzamiento H-II del Centro Espacial Tanegashima (TNSC, por sus siglas en inglés), en Japón. El ADEOS operó nominalmente durante diez meses, pero después de una aparente pérdida de poder debida a un daño estructural en su arreglo solar, dejó de funcionar el 30 de junio de 1997. El ADEOS transportaba los siguientes sensores: OCTS, AVNIR, NSCAT, TOMS, POLDER, IMG, ILAS, RIS.

El OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner) era un radiómetro de barrido mecánico tipo *whiskbroom*, y poseía un sensor central diseñado por la NASDA. Sus objetivos eran realizar mediciones de color y temperatura superficial del mar, para estimar la producción primaria del océano, realizar estudios ambientales y analizar la interacción entre el océano y la atmósfera. Poseía doce bandas de observación en el intervalo 0.402-12.5 μm con un ancho de barrido de 1 400 km y una resolución espacial de aproximadamente 700 m. Otro de sus objetivos era tener una observación global de la Tierra durante el día, el canal del Infrarrojo Térmico (TIR) se utilizaba durante la noche cuando se requería.

El AVNIR (Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer) fue un sensor central NASDA, y poseía un radiómetro de barrido opto-electrónico que usaba detectores CCD. Su objetivo era realizar observaciones de suelo y de la zona costera, así como mediciones de la luz solar reflejada desde la superficie de la Tierra. Se componía de dos unidades, el SRU (Scanning Radiometer Unit) que contenía todos los componentes ópticos, y una ELU (Electronic Unit).

NSCAT (NASA Scatterometer) fue un sensor desarrollado por la NASA/JPL. Sus objetivos eran llevar a cabo mediciones de la velocidad del viento en la superficie del océano y realizar una cobertura cada dos días bajo cualquier condición meteorológica o de nubosidad. Era un instrumento de radar en microondas (un escaterómetro Doppler de haz de abanico). Transmitía pulsos en microondas y recibía un eco retrodispersado de la superficie oceánica. Esto es, los cambios en la velocidad del viento provocan cambios en la rugosidad de la superficie oceánica, lo cual modifica la sección transversal del radar en el océano y la magnitud de la potencia retrodispersada. Al registrar múltiples mediciones adquiridas desde varias direcciones es posible resolver simultáneamente tanto la rapidez como la dirección del viento. TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) fue un sensor desarrollado por la NASA/GSFC, cuyo objetivo era observar los cambios totales de ozono, hacer una evaluación de los cambios en la radiación UV y la observación de dióxido de azufre. Sus longitudes de onda de medición eran: 308.6, 312.5, 317.5, 322.3, 331.2 y 360 nm con 1 nm de ancho de banda. El ancho de barrido era de 2 795 km. Su campo de visión instantánea (IFOV, por sus siglas en inglés) era de 50 km al nadir. Medía el albedo de la atmósfera de la Tierra en seis bandas espectrales angostas en la región del ultravioleta cercano. El albedo es medido al comparar la radiancia de la Tierra con la radiancia de un plato difusor calibrado en banda. El ozono total se obtiene a partir del albedo diferencial en tres pares de bandas espectrales, las cuales son seleccionadas para funcionar en todas las latitudes y en todas las condiciones de iluminación solar.

POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances) era un radiómetro óptico de imágenes pasivo propiedad del CNES francés, el cual estaba como instrumento huésped en el ADEOS. Sus objetivos eran la observación de la bidireccionalidad y la polarización de la radiación solar reflejada por la atmósfera: aerosoles troposféricos; color del océano (determinación precisa de las reflectancias de la superficie marina); superficies terrestres; balance de la radiación de la Tierra. POLDER poseía la capacidad de observar un área desde varias direcciones junto con las características espectrales de la luz solar reflejada. Tenía 15 canales (tres para cada banda polarizada), un ancho de barrido de 1 440 km x 2 200 (de ancho) km, una resolución espacial de terreno de 7 x 6 km al nadir. Tenía una

tasa de datos de 0.882 Mbit/s y 12 bits de cuantización. Este sensor estaba programado para operar simultáneamente con el OCTS.

IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse Gases) fue un sensor consistente en un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR); observando al nadir. Sus objetivos eran la observación detallada de los espectros de radiación IR de la superficie de la Tierra y de la atmósfera, la cartografía de los gases invernadero en una escala global (CO_2, CH_4, N_2O). El plan era que el instrumento operara de tiempo completo por tres días cada 13 días.

ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer) fue un sensor de la Agencia Ambiental de Japón (EA). Sus objetivos eran la medición de gases atmosféricos traza y de los perfiles de presión y temperatura por la técnica de ocultación solar (perfiles verticales de O_3, NO_2, aerosoles, H_2O, CFC11, CH_4, N_2O). ILAS poseía dos espectrómetros, uno era usado para la observación de los gases traza en la banda IR, y el otro para medir aerosoles, temperatura y presión del aire en la banda VIS. Las medidas de ocultación del ILAS se realizaban únicamente a latitudes altas en ambos hemisferios, debido a las características orbitales. Para su funcionamiento, ILAS se mantenía observando al Sol durante la salida y ocaso, medía la secuencia de los cambios de intensidad espectral en la luz solar la cual pasa a través de las varias alturas tangentes de la atmósfera.

RIS (Retroreflector in Space) es un reflector cúbico de esquina de un solo elemento para mediciones láser de trayectoria larga de la absorción de gases atmosféricos traza del sistema Tierra-satélite-Tierra. Tenía una estructura de reflector hueco con un diámetro efectivo de 0.5 m. Se utilizaba para realizar mediciones láser de trayectoria larga de absorción de especies atmosféricas traza como ozono (O_3), CFC12, HNO_3, metano (CH_4), CO, y otros gases por la técnica de haz de absorción láser y para apoyar dos experimentos de alcance láser de color. El intervalo de longitudes de onda empleado por el instrumento era 0.4 - 14 μm.

Bases físicas de la Percepción Remota

El estudio de las bases físicas de la percepción remota puede representarse esquemáticamente en cuatro fases o pasos: *a)* fuente de radiación; *b)* trayectoria o medio de transmisión; *c)* objetivo o blanco, y *d)* sensor.

Fuente de radiación. La fuente de radiación puede ser de tipo natural o artificial. La fuente de radiación natural utilizada en los estudios de prospección de los recursos naturales es el Sol. Nuestro Sol es una estrella típica, una gran esfera de gas luminoso, compuesto de los mismos elementos químicos que componen a

la Tierra y otros objetos del universo. Pero en el Sol (y en otras estrellas) estos elementos están calentados hasta su estado gaseoso y de plasma. Dado el gran peso de las capas solares se produce una presión enorme. La alta temperatura de su interior y las consecuentes reacciones termonucleares lo mantienen en estado gaseoso. La temperatura de la capa superficial es de 6 000 °K, aproximadamente. La parte visible del Sol es 109 veces el diámetro de nuestro planeta, su potencia de salida es de 4×10^{33} ergs/seg con lo que proporciona luz y calor al resto del sistema solar. El Sol genera esta energía de las reacciones nucleares que ocurren en su interior, donde se alcanzan temperaturas cercanas a los 14 millones °K (Abell, 1975).

La emisión de la energía o radiación solar al espacio se puede entender con el modelo de "radiación de cuerpo negro". Conceptualmente, un cuerpo negro es un absorbedor y emisor de radiación perfecto. La distribución de la energía por longitud de onda o frecuencia no es constante sino que sigue un patrón dependiente de la temperatura. La relación funcional de esta curva fue hallada por el físico alemán M. Planck, en 1900. Esta dependencia con la temperatura implica que a medida que aumenta la temperatura de un cuerpo incandescente, su color cambia del rojo al azul-blanco de acuerdo con la Ley de desplazamiento de Wien (Colwell, 1983). Puede considerarse, entonces, que el Sol se comporta de manera aproximada como un cuerpo negro con una temperatura de 6 000 °K. A esta temperatura el máximo de radiación se halla a una longitud de onda de 500 nm que corresponde al color verde-amarillo.

Espectro electromagnético. Todas las formas de energía electromagnética poseen características comunes: la forma ondulatoria de propagación y su rapidez; sin embargo, las diferentes clases de energía radiante difieren en su longitud de onda y son detectadas por medios distintos. El arreglo de radiación de todas las longitudes de onda, desde los rayos Gamma hasta las ondas de radio, se conoce como espectro electromagnético (Figura 2).

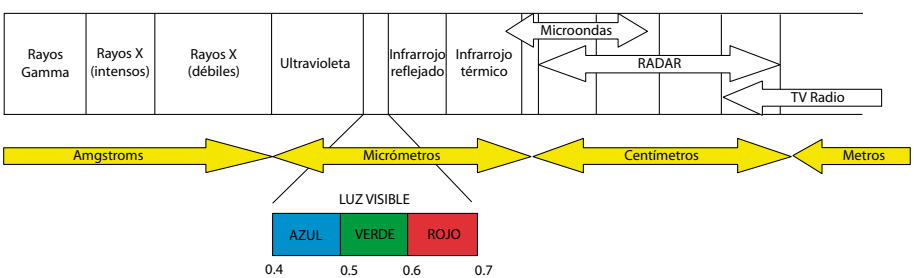


Figura 2. Espectro electromagnético.

Radiación gamma. La radiación electromagnética de las longitudes de onda más cortas, menores a 0.01 nm es conocida como radiación gamma. Los rayos gamma son emitidos en el curso de reacciones nucleares y por elementos radioactivos. La radiación gamma se genera en el interior de las estrellas; se degrada paulatinamente en luz visible por repetidas absorciones y re-emisiones de los gases que conforman las estrellas.

Rayos X. Radiaciones con longitudes de onda menores a los 20 nm comprenden a los llamados rayos-X. Las radiaciones visible, ultravioleta y rayos-X pueden detectarse fotoeléctrica y fotográficamente. Las aplicaciones de los rayos-X son muy diversas y conocidas. Unos cuantos ejemplos de las primeras aplicaciones (algunas continúan vigentes) son: *a)* localización de una bala en la pierna de un paciente; *b)* observación y fotografía de la consolidación de un hueso fracturado; *c)* descubrimiento de contrabando en un equipaje; *d)* distinción entre gemas verdaderas y artificiales; *e)* revelación de perlas en las ostras y *f)* examen del contenido en paquetes postales. Los rayos-X tienen aplicaciones en medicina no sólo en relación con fractura de huesos. Han sido también utilizados con éxito en tratamientos de células cancerosas, dado que son capaces de eliminar algunos tejidos animales más rápido que otros; asimismo, tienen aplicación en la ingeniería en la evaluación de estructuras metálicas al detectar piezas de metal fundido o fallas en las uniones de soldaduras o burbujas internas.

Radiación visible. La radiación electromagnética en el intervalo de 400 a 700 nm comprende la radiación visible. La longitud de onda exacta de la luz visible determina su *color*. La radiación con una longitud de onda en el intervalo 400 a 450 nm da la impresión en la retina del color violeta. Las radiaciones de longitudes de onda sucesivamente más largas dan la impresión de los colores azul, verde, amarillo, naranja y rojo. La mezcla de luz de todas estas longitudes de onda, en aproximadamente la misma proporción, da la impresión del color blanco. La luz no sólo es detectada con los órganos de la visión, puede también ser registrada fotográfica y fotoeléctricamente. Una emulsión fotográfica contiene haluros de plata que sufren cambios químicos cuando absorben luz. Un detector fotoeléctrico contiene sustancias fotoemisivas, las cuales liberan electrones cuando absorben fotones. Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico en 1887, y en 1905 Einstein derivó la relación entre la energía del fotón incidente y la del electrón emitido. Gracias a este análisis, Einstein obtuvo el premio Nobel.

Cuando se habla de "espectro" se hace una relación con el arco iris que se forma cuando la luz del Sol se refracta al pasar a través de un prisma de cristal. Sin embargo, los colores que vemos son una diminuta fracción de un espectro de ondas mucho mayor. Esto se conoce como espectro electromagnético.

Todas las ondas electromagnéticas son del mismo tipo y viajan con la misma rapidez, la rapidez de la luz. No obstante, la longitud de las ondas varía enormemente. Una onda de radio puede tener una longitud de onda de cerca de 30 m de longitud. Los rayos gamma de alta energía son varios órdenes de magnitud más cortas. La luz visible se encuentra aproximadamente a la mitad del espectro electromagnético. Por ejemplo, hay cerca de 1 800 ondas de "luz verde" en un milímetro. Sin embargo, las ondas *per se* no posen esa coloración, es sólo la forma en que las describimos cuando nuestros ojos reciben luz de esta longitud de onda y el cerebro lo interpreta como este color.

El sentido de la visión proporciona información detallada del entorno. Al observar un árbol cercano es posible que veamos cada hoja. Sin embargo, sólo se observa una parte diminuta de este detalle en un momento dado. Los ojos envían la información al cerebro, el cual la está procesando constantemente y buscando patrones familiares. El cerebro entonces nos dice qué estamos observando y cómo reaccionar ante esto.

Los ojos están diseñados para hacer el mejor uso de la luz disponible. Para ello poseen dos formas separadas de visión. En el ojo hay dos tipos diferentes de células que reaccionan ante la luz, éstas son llamadas conos y cilindros. Existen tres tipos de células cono, las cuales reaccionan a la luz brillante, como la proveniente del Sol. Algunas de estas células reaccionan a la luz roja, otra fracción a la luz verde y una última parte a la luz azul. Este hecho permite ver las cosas en color. Estas células definen claramente los objetos y procesan el movimiento muy rápido. Cuando la intensidad de luz decrece, las células conos disminuyen su actividad, dando paso a la acción de las células cilindro. Estas células trabajan de manera diferente a las anteriores y son sensibles a intensidades bajas de la luz. Pero sólo hay un tipo de células cilindro y, por consiguiente, no es posible ver colores sino únicamente tonos de gris. Finalmente, cuando hay oscuridad total, los cilindros empiezan a trabajar en grupo. La luz percibida por cada cilindro se suma y el mensaje resultante es enviado al cerebro. En este punto se observa poco detalle delineando los objetos grandes. Las gradaciones de luz son controladas por el iris, el cual se reduce en luz brillante y se dilata en ambientes oscuros.

Hace más de 200 años, Sir Isaac Newton publicó sus teorías científicas. En esa época se desconocía la esencia de la luz. Newton pensaba que la luz estaba constituída por partículas diminutas o corpúsculos que se movían muy rápido; esto a causa de la observación de que la luz viajaba siempre en línea recta. Sin embargo, el astrónomo holandés Christiaan Huygens pensaba que la luz viajaba en forma de ondas. La teoría de Huygens explicaba todos los fenómenos luminosos conocidos hasta entonces, pero mucha gente aceptaba las ideas de Newton.

Hacia 1861, el físico escocés James Clark Maxwell postuló la teoría de las ondas electromagnéticas donde se predecía la rapidez a la cual tenían que viajar estas ondas. Esto concordaba con la rapidez de la luz, la cual había sido medida por el experimentador francés Armand Fitzeau. De esta manera, todas las piezas del rompecabezas parecían encajar. Pero esta era una época de gran progreso científico y se hacían nuevos descubrimientos con rapidez. Hacia 1888 se inventaron las celdas fotoeléctricas (las cuales convierten luz en electricidad). Pronto se hizo evidente que la teoría ondulatoria no era capaz de explicar el efecto fotoeléctrico. La respuesta residía en el descubrimiento de que la radiación no fluye suavemente, sino en forma discreta en pequeñas parcelas llamadas "fotones". Un fotón es la cantidad de luz más pequeña que puede existir (así como la lluvia estaría formada por gotas, la luz estaría formada por fotones). Muchos años después se encontró que el fotón podía formar parte de un grupo de ondas. Así, tanto Newton como Huygens tenían razón en sus teorías.

Radiación infrarroja. Las longitudes de onda más cortas de las ondas de radio menores a un milímetro se conocen como radiación infrarroja. La radiación infrarroja con longitudes de onda menores a 0.0015 mm puede fotografiarse usando emulsiones especiales. Hay también ciertas sustancias tales como el sulfuro de plomo y el antimoniuro de indio, cuya conductividad aumenta cuando absorben fotones infrarrojos.

Otro detector infrarrojo es la termopila, consistente en un conjunto de uniones metálicas, a través del cual se induce una corriente débil por la absorción de radiación. Sin embargo, los diseños más modernos utilizan semiconductores de Germanio o Silicio que cambian su resistencia cuando absorben fotones infrarrojos. El cambio en la corriente transportada por el semiconductor mide la energía que éste absorbe. Con estos dispositivos, es posible detectar radiación infrarroja con longitudes de onda del orden de milímetros.

En 1666 Newton experimentó la descomposición de la luz en los colores del arco iris, al pasar a través de un prisma de cristal. Pensó que la región oscura más allá del final del espectro podría consistir en 'rayos de calor'. Casi 200 años después, esta idea fue confirmada por el astrónomo británico, John Herschel, quien usó un bulbo ennegrecido para mostrar que cuerpos como el Sol, y aun la Luna, liberaban calor además de luz. Descubrió también que para algunas fuentes había de hecho más energía en la 'parte oscura' del espectro que en la parte visible.

Sin embargo, no fue sino hasta principios del siglo XX que los físicos alemanes Ludwig Boltzmann y Max Planck descubrieron la relación exacta entre temperatura y radiación. Ambos mostraron que todos los objetos liberan ondas de calor. Mientras más frío es el objeto más larga será la longitud de onda promedio

de las ondas. Para 'ver' objetos a temperatura ambiente, se necesitaría observar ondas aproximadamente 20 veces más grandes que la luz visible. No obstante, para 'ver' objetos muy calientes sería necesario solamente mirar justo después de la terminal roja del espectro visible.

Por muchos años no se hizo uso de las ondas infrarrojas, dado que no había buenos métodos para detectarlas. Los primeros investigadores contaban únicamente con termómetros similares a los que había utilizado Herschel. El proceso para obtener imágenes infrarrojas detalladas fue muy lento. La introducción de materiales muy puros representó la posibilidad de crear detectores infrarrojos finos y rápidos. Actualmente, las imágenes térmicas (toma de fotografía usando radiación infrarroja) son ampliamente usadas.

Dado que las imágenes térmicas usan calor, pueden ser utilizadas para tomar fotografías con luz de día o en total oscuridad. Dado que es muy difícil enmascarar los rayos de calor, la detección de energía térmica ha sido ampliamente utilizada en la industria militar. Los barredores térmicos han sido utilizados para detectar la presencia de armamento, o de aeronaves, las cuales liberan grandes cantidades de calor. Sin embargo, los usos más importantes de las imágenes térmicas están en ingeniería, predicción del clima, medicina, química, revisión de equipos de seguridad y en ahorro de energía. Las imágenes térmicas pueden ahorrar mucho dinero al mostrar fugas de calor.

Las fotografías proporcionan más información sobre la forma de los objetos (tigres o bicicletas) que lo que se pueda decir de ellas. El cerebro, a través del sentido de la vista, es capaz de reconocer patrones. Esto es particularmente cierto cuando se ha visto algo similar previamente. Cuando se observa una fotografía del terreno tomada desde el aire o el espacio, por ejemplo, se pueden reconocer los meandros de los ríos, aun cuando no estén transportando agua. Sin embargo, con frecuencia, muchas cosas importantes están ocultas. Las fotografías aéreas pueden mostrar sitios de antiguas construcciones porque el pasto crecido sobre las paredes tiene ligeras diferencias en los tonos verdes. Algunas veces estas variaciones en color son difíciles de observar, o están encubiertas por geoformas (por ejemplo, la pendiente del terreno).

El procesamiento de imágenes digitales mediante una computadora permite hacer un análisis fino de ellas al realizar pequeñas diferencias espectrales o de color para hacerlas más claras. Imágenes tomadas en blanco y negro pueden realizarse en más tonos de gris de lo que nuestros ojos pueden ver y codificarse en diferentes colores. Este método es utilizado en las imágenes térmicas para resaltar las diferencias de temperatura (*e. g.* temperatura superficial del mar, temperatura superficial de la tierra, etc.).

RADAR. En 1936 se inventó el radar (RAdio Detection And Ranging) y muy pronto se vio la posibilidad de crear 'imágenes de radio'. Elementos tales como ríos, caminos y líneas costeras se podían identificar con claridad. En poco tiempo las aeronaves pudieron navegar con precisión, aun en condiciones meteorológicas adversas, gracias a las imágenes del terreno subyacente tomadas con radar.

Los radares modernos utilizan los mismos principios, pero las señales de radio son ahora procesadas con computadoras antes de desplegarlas en pantalla. El proceso incluye filtraje de ruido, realces, ubicación geográfica en latitud y longitud.

Las imágenes se obtienen mediante un proceso interactivo: se envían ondas de radio y se espera la interacción de éstas con el terreno y el retorno de la señal modificada. Sin embargo, también es posible tomar imágenes de objetos utilizando las ondas de radio emitidas por ellos mismos. Estas ondas son poco energéticas, más débiles aun que las ondas infrarrojas. No obstante, los satélites pueden utilizar las ondas de radio para medir la cantidad de agua bajo el terreno en regiones desérticas.

Las ondas de radio tienen las longitudes de onda más largas, alcanzando varios kilómetros. Así, las ondas usadas en comunicación de onda-corta y en señales de televisión tienen longitudes de onda en un intervalo que va de centímetros a metros. Cuando estas ondas pasan por un conductor, tal como una antena de radio, inducen una corriente eléctrica débil, la cual puede ser amplificada hasta poder ser detectada por aparatos eléctricos.

Ondas sonoras y vibraciones. Los sonidos que escuchamos son vibraciones en el aire detectadas por nuestros oídos. Estas vibraciones pueden variar desde frecuencias bajas (menos de una por segundo) hasta frecuencias muy altas (millones por segundo). Sólo una parte de este intervalo puede ser escuchado, el cual es conocido como intervalo sónico.

La región por debajo del límite inferior sónico se conoce como infrasonido. El ser humano puede percibir la vibración causada por el infrasonido pero no escucharlo. Las vibraciones arriba del límite superior sónico se conocen como ultrasonido y pueden formarse en haces bien definidos. Estas vibraciones se utilizan para generar imágenes de 'sonido' en la misma forma que los radares. Un claro ejemplo son las imágenes de ultrasonido para observar el desarrollo embrionario de los fetos. El principio básico es el mismo: se envían ondas ultrasónicas y se 'escuchan' los ecos. Las ondas se producen mediante un grupo de cristales llamados transductores. Este sistema hace un barrido del vientre materno, la imagen se procesa por computadora y se observa el resultado en la pantalla.

Para la mayoría de la gente el límite inferior está entre diez y veinte vibraciones por segundo, pero el límite superior varía con la edad. Los niños pequeños

son capaces de escuchar hasta veinte mil vibraciones por segundo, pero, con el paso del tiempo esto se reduce a las diez mil vibraciones por segundo o menos.

Algunos ejemplos de frecuencias sónicas se tienen en el sonido producido por los tambores, los cuales generan vibraciones lentas que pueden ser escuchadas desde lejos o bien el sonido producido por los órganos de las iglesias que cubren casi por completo el intervalo sónico. Los barcos utilizan este tipo de señales con las eco-sondas, las cuales miden la batimetría al enviar haces de ondas sonoras hacia el fondo del mar. La palabra SONAR proviene de SOund Navigation And Ranging. La idea de buscar cosas en el mar utilizando ondas de sonido fue ampliamente explotada durante la Segunda Guerra Mundial como ayuda en la búsqueda de submarinos. Sin embargo, los operadores de SONAR pronto se percataron que podían detectar peces tan fácilmente como submarinos. Después de la guerra muchas embarcaciones pesqueras fueron equipadas con sonares. El sonar funciona en la misma forma que los ecosondas al enviar una haz de ondas de sonido en el agua y escuchar los ecos. El haz puede ser dirigido hacia cualquier dirección, lo que permite generar imágenes de todo el entorno en un rango amplio y graficarse en una carta. Los primeros equipos de sonar eran difíciles de usar porque el operador tenía que recordar de donde provenían todos los ecos y si eran de peces, rocas o de otro bote y daba aviso a la tripulación. Actualmente, toda la información es almacenada en computadoras y desplegada en pantallas; la tripulación puede ver exactamente por donde se mueven los cardúmenes y orientar el bote para capturarlos. El operador del sonar hace un lento barrido circular de su entorno hasta detectar un cardumen y, una vez localizado, mediante el haz se miden la profundidad, localización y su rapidez, permitiendo una buena pesca.

Ventanas atmosféricas

La radiación electromagnética proveniente del Sol tarda aproximadamente ocho minutos en alcanzar la Tierra. En ese punto la radiación solar interactúa con la atmósfera terrestre. Los componentes de la atmósfera (nitrógeno, oxígeno, CO_2, vapor de agua, O_3, etc.) absorben, reflejan y dispersan la radiación, en forma selectiva, en función de la longitud de onda. Por lo tanto, la transmisibilidad atmosférica posee características espectrales. Las regiones donde la radiación electromagnética pasa sin interactuar significativamente con los elementos de la atmósfera se conocen como "ventanas atmosféricas".

La radiación ultravioleta hasta las 0.3 micras es opaca. De este punto hasta el inicio del visible hay poca absorción. La atmósfera no absorbe radiación visible

Tabla 1. Importantes líneas de absorción molecular en la atmósfera

Molécula	Visible e IR (λ en μm)	Microondas (ν en GHz)
H_2O	0.9, 1.1, 1.4, 1.9, 2.7, ≈6	22.235, 183.3
O_2	0.8	≈60, 118.75
CO_2	2.7, 4.3, ≈14	
N_2O	4.6, 7.7	
O_3	9.5	

pero dispersa los colores en intensidad diferente, siendo mayor en el azul que en el rojo. El infrarrojo presenta diferentes regiones de interacción. Las principales ventanas atmosféricas del infrarrojo se encuentran intermitentemente desde 0.7 a 2.5; de 3.5 a 4.2; y de 9 a 13 micras. Existen dos largas zonas opacas del infrarrojo localizadas, la primera de 5 a 8.5 micras aproximadamente y, la segunda de 14 a 25 micras. Los principales compuestos absorbentes son vapor de agua y CO_2.

En la percepción remota de la superficie terrestre, la atmósfera es un medio perturbador, la cual impide la correcta medición de los elementos de la superficie en una gran parte del espectro electromagnético. En algunas regiones espectrales, *e. g.*, el infrarrojo lejano cerca de las 100 micras de longitud de onda, la presencia de muchas líneas de absorción intensa causadas por los constituyentes atmosféricos inhibe la utilidad de la percepción remota. Por otro lado, las líneas espectrales caracterizan los elementos absorbentes de manera inequívoca y la intensidad y ancho de las líneas reflejan los parámetros físicos (temperatura, densidad) en el volumen observado. Así, las líneas espectrales son la clave importante para la percepción remota de la atmósfera misma.

Uno de los constituyentes más importantes de la atmósfera es el vapor de agua, no sólo por su efecto determinante en el desarrollo de sistemas meteorológicos en la troposfera, sino también como un asociado importante en las reacciones fotoquímicas en la estratosfera y en la mesosfera y como un agente importante del intercambio de calor y los movimientos en la atmósfera. El dióxido de carbono es otro importante constituyente de la atmósfera que causa una fuerte absorción en la región del infrarrojo lejano.

El ozono es abundante de manera importante a alturas estratosféricas y contribuye considerablemente a la absorción total en sólo una pequeña región del infrarrojo. El ozono, sin embargo, absorbe mucho más en el ultravioleta y también en el intervalo de longitudes de onda milimétricas.

Tabla 2. Importantes ventanas atmosféricas espectrales

Visible e IR (λ en μm)	Radio (ν en GHz)
0.3 - 0.9	0.1 - 15
1.0 - 1.1	25 - 35
1.2 - 1.3	80 - 100
1.5 - 1.8	140 - 160
2.0 - 2.4	230 - 250
3.5 - 4.0	260 - 290
4.6 4.9 y 8.0 - 13	

Otras moléculas atmosféricas que influyen de manera importante en la atenuación de la radiación electromagnética son el oxígeno (O_2) y el metano (CH_4).

Firmas espectrales

Después que la radiación electromagnética atraviesa las capas atmosféricas sufriendo los procesos de absorción, dispersión y reflexión, la energía resultante incide sobre la superficie terrestre. En ella vuelve a presentarse un conjunto de interacciones entre la radiación y los elementos presentes en la superficie.

Los elementos que se encuentran en la superficie terrestre reflejan la radiación solar, como reflectores especulares (cuando la superficie es suave) o como reflectores Lambertianos (cuando la superficie es completamente rugosa), en procesos donde la reflectancia depende únicamente en la radiación incidente y en la dirección de observación; es decir, la dependencia espectral o procesos de absorción no se han considerado. Considerar este hecho habla de la reflectancia espectral, la cual nos es familiar dado que es lo que permite identificar a los objetos por su color.

La composición de la superficie es compleja dada la combinación natural de los diferentes elementos presentes en ella. Una primera aproximación en el entendimiento de esta interacción es la de analizar la reacción o respuesta espectral de cada uno de los elementos por separado. La respuesta espectral de los elementos es una combinación de procesos de absorción y reflexión de la energía electromagnética por los átomos y moléculas constituyentes del material terrestre.

Los diferentes materiales en la superficie tienen, en general, curvas de reflectancia espectral de diferentes formas, y esto forma la base para la identificación

de materiales desde sensores remotos. La forma de la curva de reflectancia espectral de un material determinado se conoce como firma espectral (Figura 3).

La reflectividad del agua pura es muy pequeña (2% en la región visible) y es casi constante sobre este rango de longitudes de onda y está determinado por su índice de refracción.

La reflectividad de la materia vegetal, por otro lado, está dominada por la presencia de pigmentos absorbentes (el cual produce un pequeño pico en la banda visible) y por múltiples reflexiones internas en las interfases entre las paredes celulares hidratadas y los espacios de aire intercelulares, lo cual produce la alta reflectividad en el infrarrojo cercano, entre 0.7 y 1.3 μm. Si la vegetación está enferma, la estructura de la pared celular está dañada y la alta reflectividad de la región infrarroja se reduce. Esto proporciona una forma de diagnosticar y evaluar con técnicas de PR la salud de los cultivos.

El más importante de los pigmentos absorbentes es la clorofila, la cual tiene regiones de absorción a 0.45 y 0.65 μm y, en consecuencia, posee un máximo local en la reflectancia espectral alrededor de 0.55 μm. Esto explica el color verde de la mayor parte de la materia vegetal y también puede explicar el porqué del color amarillento de la vegetación enferma. Otros pigmentos de importancia son los carotenos y las xantofilas (las cuales dan espectros de reflectancia amarillo-naranja) y las antocianinas (rojo-violeta). Estos últimos pigmentos dominan en el otoño, cuando la clorofila se descompone o se degrada, dando lugar a los espectaculares colores de las hojas en el otoño. Entre 1.3 y 2.7 μm, la absorción de

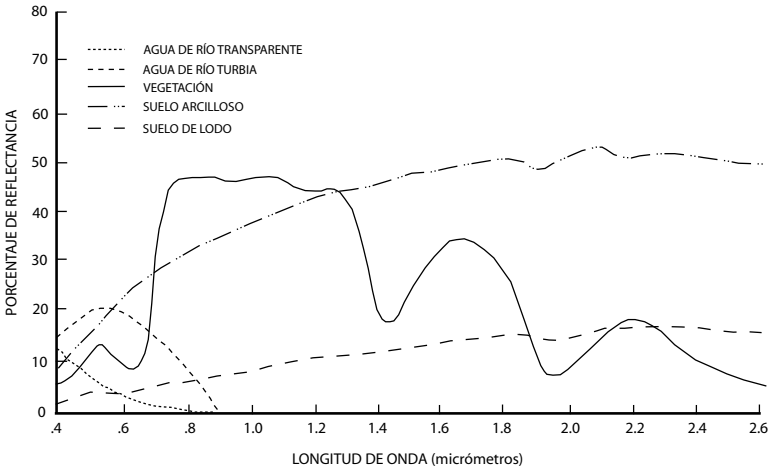


Figura 3. Firmas espectrales de elementos naturales comunes.

la radiación infrarroja por moléculas de agua decrece la reflectividad (Schanda, 1986).

La alta y comparativamente uniforme reflectancia de la nieve en las bandas del visible y del infrarrojo cercano es causada por un gran número de eventos de dispersión no-selectivos (*i. e.* independientes de la longitud de onda) que sufren los fotones en las muchas interfases entre hielo y aire. Un argumento similar es válido para explicar el color blanco de las nubes.

Las variaciones de la reflectancia espectral de las rocas son menos evidentes que la de la materia vegetal, en el sentido de que es más difícil reconocer un comportamiento espectral típico de las rocas. Los espectros de reflectancia de los minerales dependen fuertemente de la composición química de las rocas. Por ejemplo, los óxidos de hierro tienen mínimos característicos de reflectancia por debajo de 0.5 y cerca de 0.9 μm, mientras que los carbonatos y arcillas están dominados por varias regiones angostas de absorción entre 2.1 y 2.5 μm. El intemperismo de las rocas y las propiedades locales de rugosidad de su superficie también juega una parte importante en la modulación de la reflectancia espectral.

Las propiedades de reflectancia de los suelos son claramente dependientes del tipo de roca de la cual se deriva el suelo, pero también dependen fuertemente del contenido de material vegetal y agua, las cuales afectan la reflectividad. Hay también una posible interacción entre el tipo de suelo y la reflectancia espectral de la vegetación creciendo en ese suelo, dado que los elementos traza en el suelo pueden influir en el patrón de crecimiento de la vegetación. La aplicación práctica de esto es la Geobotánica, en la cual la prospección geológica se lleva a cabo observando cambios en el color de la vegetación. Esto es particularmente útil en la detección de cobre.

Sensores remotos

La energía reflejada o emitida por la superficie terrestre sigue su trayectoria de regreso a través de la atmósfera, donde se atenúa por dispersión. Esta señal puede ser captada por sensores remotos aerotransportados o a bordo de satélites.

Los sensores remotos pueden ser clasificados como pasivos, activos, formadores de imágenes o de señales.

Los sistemas activos iluminan el objeto de estudio con su propia fuente de radiación, mientras que los sensores pasivos detectan la radiación proveniente de fuentes naturales (emisión térmica o solar reflejada).

La elección de sistemas pasivos o activos depende de muchos factores. Un sistema pasivo es inapropiado en ciertas longitudes de onda en las cuales hay cantidades insignificantes de radiación natural. Un sistema activo puede ser técnicamente inadecuado si la cantidad de potencia que tenga que ser radiada para obtener una señal reflejada mensurable es muy grande.

Un sistema formador de imágenes es un poco más difícil de definir. Se utilizará el término para indicar un sistema, pasivo o activo, que mide la intensidad de la radiación que incide en él como función de la posición sobre la superficie terrestre, de tal suerte que es posible construir una representación bidimensional de esta radiación o intensidad. Un sistema que no forma imágenes es, por consiguiente, aquél que, o bien no mide la intensidad de la radiación o no la mide como función de la posición sobre la superficie terrestre. Sin embargo, esto nos constriñe a utilizar el término imagen en forma restringida. Es importante notar que la condición espacial en un sistema formador de imágenes se puede reducir al enunciado que indique que para una posición única del sistema, éste debería medir la intensidad de la radiación de varias regiones discretas distribuidas en una o dos dimensiones. Una dimensión es adecuada para la creación de una imagen, dado que el movimiento de la plataforma (la cual transporta al sensor) en dirección perpendicular puede realizar el barrido bidimensional necesario.

Algunos ejemplos importantes de sensores remotos son las cámaras fotográficas. En consecuencia, la fotografía aérea representa la forma moderna pionera de los sistemas de percepción remota. A continuación se señalarán algunos aspectos relevantes sobre las aplicaciones de la fotografía aérea.

Estéreo-fotografía. A primera vista puede parecer sorprendente que la fotografía aérea contenga información sobre las alturas de elementos ubicados sobre la superficie. Para extraer el máximo de información es necesario utilizar un par de fotografías con un traslape del 60% para lograr visiones estereoscópicas. Pero sólo una fotografía contiene información en la forma de desplazamiento de relieve.

Las aplicaciones de la fotografía aérea son, en general, bien conocidas y, con excepción del uso de la película infrarroja, la correspondencia entre una imagen fotográfica y la percepción proporcionada por el ojo y cerebro humano es lo suficientemente grande para que en muchas aplicaciones se tenga, en cualquier caso, una idea intuitiva de ellas. Las ventajas principales de la fotografía, como una técnica de PR, son, por un lado, la facilidad de adquisición y control y, por otro lado, que los sistemas ópticos de las cámaras pueden hacerse con la suficiente precisión para obtener información espacial cuantitativa de las imágenes resultantes. De esta forma, existe una gama de aplicaciones de la fotografía en mapeos y levanta-

mientos en disciplinas como: geología, hidrología, en análisis de terreno, mapeo de campo, planeación regional y estudios de formas de cultivos. La película de color se ha utilizado especialmente en estudios de vegetación (agricultura, bosques, ecología), en geomorfología, hidrología y oceanografía, entre otros.

La película en blanco y negro del infrarrojo cercano ha sido de gran utilidad en estudios de humedad del suelo, erosión y levantamientos arqueológicos. La película infrarroja de falso color ha sido aplicada en la clasificación de áreas urbanas, en el monitoreo de la humedad del suelo, en la evaluación de desastres y particularmente en el mapeo de la vegetación.

Sistemas electro-ópticos. En general, en el caso de los sistemas fotográficos la radiación se detecta mediante procesos químicos. Hoy en día, sin embargo, las cámaras y videos digitales han ido desplazando a los sistemas tradicionales, insertándose en otro tipo de sistemas: los electro-ópticos. En estos sistemas la radiación incidente es convertida en una señal eléctrica, la cual puede ser detectada, amplificada y, posteriormente, procesada electrónicamente.

Este tipo de sistemas puede dividirse en sistemas de barrido y de no-barrido. La fotografía aérea se considera como un sistema de no-barrido. Es claramente un sistema productor de imágenes en el sentido discutido previamente, dado que forma una representación bidimensional de la distribución, en un plano, de la intensidad de la radiación. Es un sistema de no-barrido en el sentido que la imagen es registrada virtualmente en forma instantánea en un arreglo bidimensional (el negativo). Esto se hace de forma más o menos analógica, registrando la variación continua de la intensidad sobre todos los puntos en el negativo. De hecho, los granos individuales pueden convertirse o no a plata, de tal forma que, a nivel microscópico, la fotografía tiene mucho en común con los sistemas digitales. Las incertidumbres estadísticas inherentes al proceso se traducen en que, a nivel macroscópico, se vea como un proceso analógico. No obstante, es fácil imaginar un sistema en el cual el negativo sea reemplazado por un arreglo bidimensional de muchos detectores, donde cada uno de ellos generará una señal eléctrica dependiente de la intensidad de la luz incidiendo en el sistema. Estas señales pueden entonces registrarse y, subsecuentemente, analizarse para ver la imagen.

Evidentemente este dispositivo sería, en términos de funcionalidad, equivalente a una fotografía, pero con la gran ventaja de que los datos podrían transmitirse electrónicamente y procesarse en una computadora. Este tipo de sistemas existe en forma de dispositivos de cargas acopladas bidimensionales, mejor conocidos como Charge-coupled devices (CCD). Un CCD consiste, en general, en un arreglo mono o bidimensional de elementos sensitivos. La exposición a la radiación electromagnética genera una carga eléctrica, proporcional a la energía

incidente, en cada elemento. La gran ventaja de los CCD es que estas cargas pueden pasar de un elemento al siguiente, bajo un adecuado control electrónico, y tomar la lectura en el borde del arreglo, como un registro corrido. De esta forma, el número de conexiones requeridas para un arreglo rectangular de n por m elementos es (n + m) en lugar de (n X m).

La complejidad y costo de un sistema discreto con un millón de elementos sensibles obligó a la búsqueda de una solución más sencilla. Es más simple usar un arreglo de detectores unidimensional o un solo detector, y luego girar la dirección desde la cual este detector, o arreglo de detectores, capta la información, para construir el arreglo bidimensional de datos que se requiere. Este concepto es la base de los sistemas de barrido.

Uno de los dispositivos de barrido en operación más común es el barredor de línea o barredor de un solo elemento (conocidos como *whisk-broom*). Este dispositivo tiene, como su nombre lo indica, un solo detector, o bien, un sensor por cada banda espectral a la cual responde el instrumento. El área sobre la superficie desde la cual se captura la información, es barrida en una dimensión, usualmente mediante un espejo rotatorio. El barrido se realiza en la dirección perpendicular al movimiento de la plataforma transportando el sensor. El barredor multiespectral y el mapeador temático (por sus siglas en inglés: MSS y TM, respectivamente) de la serie LandSat funcionan de esta manera.

Existen otros tipos de dispositivo de barrido, como el *pushbroom* utilizado en los sensores Alta Resolución Visible (HRV, por sus siglas en francés) de la plataforma francesa SPOT. En este tipo de instrumentos hay un arreglo lineal de sensores, realizando un barrido cuasi-instantáneo en la dirección transversal del movimiento de la plataforma. Este tipo de instrumentos no tiene partes móviles y es, en consecuencia, potencialmente más pequeño, ligero, barato y más confiable que los barredores de línea. Su desventaja estriba en que al haber del orden de un millar de detectores por banda espectral, en vez de pocos sensores (seis en el caso del MSS y cuatro en el del TM), cada uno de ellos requiere calibración. Este tipo de sensores es utilizado en aviones y en satélites en órbita polar. Para el caso de los satélites en órbita geoestacionaria el concepto de barrido es diferente. En este caso, el instrumento permanece sobre un punto fijo sobre el ecuador terrestre. El método usual de barrido es una forma modificada del barrido en línea, en el cual el barrido lado a lado (este-oeste) se logra haciendo rotar al satélite sobre su eje (el cual está alineado en forma paralela al eje polar terrestre), mientras que el barrido atrás-adelante (norte-sur) se logra rotando lentamente un espejo en el instrumento. Este es el método utilizado en el Radiómetro de Giro y Barrido

Visible e Infrarrojo (VISSR, por sus siglas en inglés) transportado por los satélites meteorológicos METEOSAT y GOES.

Detectores de radiación visible y del infrarrojo cercano. Las bandas en el visible normalmente utilizan foto-multiplicadores como detectores. El fotomultiplicador es un dispositivo sencillo basado en el efecto fotoeléctrico, en el cual un fotón que incide sobre un fotocátodo libera un electrón. Este electrón es acelerado hacia un electrodo intermedio, a un potencial más positivo que el cátodo y el incremento de energía cinética permite la liberación de varios electrones del electrodo intermedio. Este proceso, conocido como "efecto cascada", se repite varias veces, aumentando el número de electrones en cada paso, hasta que se genera una corriente mensurable. La magnitud de esta corriente depende de la intensidad de la radiación incidente.

La radiación en el infrarrojo cercano es detectada mediante fotodiodos. El fotodiodo es un dispositivo de semiconductores acoplados, usualmente Antimoniuro de Indio (InSb) o Sulfuro de plomo (PbS), en el cual un fotón incidente genera una corriente o voltaje a través de la unión. La señal es proporcional a la intensidad de la radiación.

Un diodo semiconductor consta de dos piezas de cristal semiconductor en íntimo contacto. Una de las piezas es "contaminada" con una traza de impureza lo cual produce un exceso de electrones, y la otra con una impureza que le da un déficit de electrones. Éstos son referidos como material tipo-n (cargados negativamente) y material tipo-p (cargados positivamente con "agujeros", sin electrones), respectivamente. En la unión, los agujeros del tipo-p se difunden en el material tipo-n, donde se combinan con los electrones libres. Un efecto correspondiente ocurre en la dirección opuesta dando origen a una región de depleción de muy baja conductividad. Al haber ahora un exceso de cargas positivas en el material de tipo-n y de cargas negativas en el material de tipo-p, se forma un campo eléctrico de tipo-n a tipo-p a través de la región de depleción. Este campo inhibe una posterior difusión de cargas.

La máxima longitud de onda del fotón que puede ser detectada por un fotodiodo se determina por la energía requerida para crear un par electrón-hueco. Esto se conoce como la banda-vacío del semiconductor. Las características de esta banda-vacío dependen del compuesto químico utilizado.

Otro tipo de detector ampliamente utilizado es el vidicon. El vidicon es un tipo de cámara de televisión y fue el pionero de los dispositivos electro-ópticos utilizados en la obtención de imágenes desde el espacio, en el intervalo visible de la radiación electromagnética. El vidicon consta básicamente de una lente, un diafragma y una lámina de material fotoconductor cubierto en el lado cercano a

la lente con un conductor transparente. El otro lado de la lámina fotoconductora es iluminado con un haz de electrones los cuales son deflectados electrostáticamente para repercutir en cualquier parte de la lámina. Las primeras misiones LandSat utilizaron un dispositivo conocido como vidicon de haz de retorno (RBV, por sus siglas en inglés) cuya operación estaba basada en el principio anterior.

Detectores de radiación infrarroja térmica. La radiación térmica también es detectada mediante semiconductores. Las características de éstos difieren de los utilizados en el infrarrojo cercano. La principal diferencia radica en que para detectar la radiación térmica es necesario tener valores más pequeños en la banda-vacío y, en consecuencia, valores más altos de máxima longitud de onda. Para ello se utilizan materiales con composiciones químicas más exóticas que el InSb. En particular, el telururo mercúrico de cadmio ($Hg_{0.2}Cd_{0.8}Te$) puede ser utilizado, usualmente en el modo fotoconductor, hasta los 15 μm, lo cual cubre adecuadamente la región del infrarrojo térmico del espectro electromagnético; asimismo, es necesario enfriar cualquier detector de infrarrojo térmico, para ello se utiliza nitrógeno líquido (a 77 °K), de tal suerte que la radiación térmica en exceso no sea generada por el sensor mismo.

Existen otros tres tipos de detectores de infrarrojo térmico: los bolómetros, las termopilas y los dispositivos piroeléctricos.

El bolómetro es un dispositivo simple que consta, en esencia, de un material cuya resistencia varía con la temperatura. El efecto de la radiación incidente en la región del infrarrojo térmico es causar un aumento de la temperatura, lo cual puede también ser detectado. Los elementos detectores pueden ser tiras de platino, cuya resistencia aumenta con la temperatura, o termistores, que son dispositivos semiconductores fabricados con una mezcla de óxidos de metales. La resistencia decrece con la temperatura como resultado de un aumento en la densidad de carga de los portadores. La principal desventaja de los bolómetros es su larga respuesta en tiempo.

Una termopila es una serie de termopares. Cada uno de éstos funciona de acuerdo con el Efecto Seebeck, en el cual se genera una diferencia de potencial a través de un par de uniones entre metales disímiles cuando las uniones son mantenidas a diferentes temperaturas. Como el bolómetro, la termopila tiene una larga respuesta en tiempo, y no es particularmente sensitivo. Es mecánicamente delicado pero responde bien a longitudes de onda cercanas hasta los 30 μm.

Un detector piroeléctrico es, en esencia, un cristal que sufre una redistribución de su distribución de cargas original. Esto se da como resultado de un cambio en su temperatura. La separación de cargas ocurre en la superficie del cristal, resultando en una diferencia de potencial la cual puede ser amplificada y

detectada. Esto se hace usualmente mediante la interrupción periódica de la radiación incidente a 1 Khz, y midiendo la componente de la señal de salida la cual alterna con la frecuencia de corte. La gran ventaja de los detectores piroeléctricos es que responden muy rápido a los cambios de temperatura y son muy sensitivos a longitudes de onda cercanas a los 70 μm.

Detectores pasivos de microondas. La detección pasiva de las microondas se realiza mediante un radiómetro. Este es un dispositivo que mide la radiación térmicamente generada en la región de las microondas ubicada en el intervalo de frecuencias 5-100 GHz. Dado que las longitudes de onda de las microondas son mucho más grandes (frecuencias más bajas) que las del visible y del infrarrojo, la resolución límite juega un papel importante, por lo que hay que hacer consideraciones cuidadosas a los factores que la determinan.

La radiación electromagnética es detectada a través de su influencia en los electrones, los cuales son excitados a estados de energía más altos por los fotones incidentes. La energía de un fotón de microondas es del orden de algunos micro electrón-volts (≈ μeV), lo cual es muy poco para excitar un electrón a través de una banda-vacío atómica o molecular. Por esta razón se utilizan metales conductores en la detección de microondas. La onda electromagnética incidente induce una corriente fluctuante en el conductor, la cual puede, subsecuentemente, ser amplificada y detectada. La antena es una estructura que sirve como transición entre las ondas propagándose en el espacio libre y los voltajes fluctuantes en el circuito al cual está conectada.

La forma usual de una antena de microondas es un disco parabólico, aunque otros diseños también son posibles. En el diseño de una antena de este tipo se deben considerar los siguientes dos aspectos: *a)* la necesidad de lograr una alta sensibilidad en la dirección deseada, y *b)* la necesidad de lograr una alta resolución angular (ancho de banda angosto). Ambos requisitos se logran construyendo la antena tan grande como sea posible.

Un radiómetro de microondas posee una sensibilidad espacial definida conocida como huella (*footprint*) y equivale al concepto de píxel. Por lo tanto, el radiómetro de microondas debe poder hacer un barrido de esta huella a uno y otro lado para obtener información de un ancho determinado. Este barrido se logra de dos maneras. El primer método consiste en mover la antena mecánicamente. La antena puede rotar u oscilar con respecto al resto del instrumento o bien la plataforma completa puede rotar. Este último enfoque ha sido utilizado en las plataformas satelitales. Sin embargo, cualquier forma de barrido mecánico puede generar vibraciones u oscilaciones indeseables o residuales, especialmente por el hecho de que un sistema de microondas pasivo usualmente tiene antenas

grandes y, por ende, pesadas para lograr huellas razonablemente pequeñas. El barrido electrónico evita estos problemas.

La antena de barrido electrónico no tiene partes movibles. Consiste en un arreglo regular muy cerrado de antenas más pequeñas (*e. g.*, guías de onda, dipolos). Las señales detectadas pueden ser de fase avanzada o retardada bajo control electrónico. De este hecho se deriva su nombre alternativo de sistema de arreglo de fase.

El satélite SeaSat transportaba, entre otros instrumentos, un radiómetro pasivo de microondas llamado Radiómetro de barrido de microondas multicanal (SMMR, por sus siglas en inglés). Aunque el SeaSat sobrevivió sólo tres meses después de su lanzamiento en junio de 1978, un SMMR está en operación en los satélites de la serie NIMBUS.

Sensores activos. Este tipo de sensores fue definido previamente como aquellos que poseen su propia fuente de radiación. Se ha visto que los sensores pueden clasificarse como productores de imágenes o de señales o bien por la longitud de onda empleada. En el caso de los sensores activos pueden ser clasificados en una tercera forma, la cual está de acuerdo con el uso que se dé a la señal de retorno. Así, cuando el interés está en el tiempo de retraso entre la transmisión y la recepción de la señal, se utiliza el método conocido como técnica de alcance. Si el interés está en la magnitud de la señal de retorno se utiliza el método conocido como técnica de dispersión. Obviamente, la división no es tajante pero permite ubicar la funcionalidad de los sensores remotos activos.

Sistemas de Alcance (*Ranging Systems*). Uno de los sistemas más importante dentro de esta clasificación es el perfilador láser. Este instrumento es una aplicación de la técnica LIDAR, el cual es un acrónimo, similar a RADAR, formado por LIght Detection and Ranging. Este instrumento es utilizado tanto en mediciones de alcance como en sondeos atmosféricos (Measures, 1984).

El principio del perfilador láser es muy sencillo. Un pulso de radiación (usualmente infrarroja) es emitido por el instrumento hacia la superficie y su "eco" es detectado en algún momento posterior. Midiendo el tiempo de retraso y conociendo la rapidez de propagación del pulso, es posible determinar la distancia (alcance) del instrumento a la superficie. Con el envío de una serie continua de pulsos se puede construir un perfil del alcance, y si la posición de la plataforma, como función del tiempo, es conocida con precisión, es posible deducir el perfil de la superficie iluminada.

Un perfilador de este tipo consiste en un transmisor formado por un semiconductor láser de Arseniuro de Galio (GaAs), el cual es capaz de producir pulsos cortos e intensos con una resolución espacial pequeña con una longitud de onda

centrada en 0.9 μm. El receptor es un fotodiodo. Un intervalómetro, con una resolución del orden de 1 ns, es activado por la señal generada por el transmisor de pulsos y detenido al recibir el pulso de retorno. El tiempo de viaje del pulso, T_t, está dado por:

$$T_t = \frac{2H}{c},$$

donde H es el alcance y c es la rapidez de propagación del pulso, por consiguiente, la distancia (alcance) se determina del siguiente modo:

$$H = \frac{cT_t}{2}$$

Una característica deseable de este tipo de sistemas es que tenga una alta resolución espacial en la superficie, es decir, que los puntos muestreados estén lo suficientemente cercanos entre ellos, y una alta resolución de alcance y que su sensibilidad sea lo suficientemente grande para detectar señales de retorno de superficies que reflejen débilmente.

Otro instrumento de alcance es el radar altímetro, el cual funciona de manera similar al perfilador láser. El principio básico del tiempo de retorno de un pulso corto entre el instrumento y la superficie es el mismo. El perfilador láser mide a través de una de las dos ventanas atmosféricas más importantes y el altímetro observa a través de la otra. Muchas de las diferencias entre el tipo de información obtenida entre estos dos instrumentos, puede atribuirse a la resolución angular más grande del altímetro, debido a que utiliza longitudes de onda mayores. Los altímetros han sido empleados en aeronaves, como apoyo en la navegación. También han sido utilizados en aviones y satélites en la investigación de las superficies terrestre y marina.

Sistemas de dispersión. Este tipo de sistemas hacen uso directo de la potencia retro-dispersada. Los sistemas ópticos como el LIDAR son capaces de medir la intensidad de la señal de retorno. Entre sus principales aplicaciones está el sondeo de nubes, la discriminación entre hielo y agua en las nubes, la medición de albedos de la superficie, perfiles de ozono y aerosoles y el sondeo Doppler de la rapidez del viento. Sin embargo, en el sentido estricto de percepción remota, se mencionarán principalmente a los sistemas de radar: el escaterómetro, el radar de visión lateral (imágenes de radar de apertura real) y finalmente el radar de apertura sintética.

El radar de apertura real puede lograr una resolución espacial alta en una dimensión al resolver la parte temporal de la señal de retorno desde un pulso

muy corto. La resolución en la dirección perpendicular se logra por el método normal de emplear una antena tan grande como sea posible. Este enfoque no es posible para radares transportados en satélites, dado que el tamaño de la antena requerido para lograr una resolución adecuada sería impracticablemente grande. En lugar de esto, una apertura (antena) grande puede sintetizarse y la técnica es conocida como radar de apertura sintética.

Un radar escaterómetro es en general un sistema que no produce imágenes y que proporciona una medición cuantitativa de la sección transversal de retro-dispersión diferencial σ^0, en función del ángulo de incidencia. La sección σ^0 se define de tal forma que si una densidad de flujo $F(Wm^{-2})$ incide sobre una partícula sola, la potencia dispersada es $F\sigma$. Esta cantidad tiene unidades de área.

Como consecuencia de la dependencia de σ^0 con las propiedades de la superficie, la escaterometría es una técnica especialmente útil en la medición de la rugosidad de las superficies. Tiene amplias aplicaciones en la caracterización del océano, rocas, vegetación y superficies de mares de hielo.

Un escaterómetro transmite una señal continua o una serie de pulsos. La señal de retorno es registrada, y su magnitud es usada para calcular el valor de σ^0 para la parte de la superficie iluminada. Conocer el valor de σ^0 en función del ángulo de incidencia permite identificar el material de la superficie o bien deducir sus propiedades físicas. Esto se puede lograr de dos formas. Una es utilizando un escaterómetro de haz angosto, el cual puede ser dirigido para apuntar al área objetivo. Conforme se mueve la posición de la plataforma, el radar sigue al área objetivo y se forma el diagrama de retro-dispersión. Un segundo método es usar el procesamiento Doppler de la señal.

Radar de visión lateral. Dos de los instrumentos activos de dispersión con la capacidad de formar imágenes son el radar de visión lateral (SLAR, por sus siglas en inglés) y el radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés). El SLAR utiliza una técnica conocida como radar de apertura real (RAR, por sus siglas en inglés). Este instrumento evolucionó en la década de los años cincuenta, como una herramienta de reconocimiento militar, a partir del radar indicador de plan de posición (PPI, por sus siglas en inglés) desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial. El SLAR observa a un lado de la dirección de vuelo y es capaz de producir un mapa continuo de franjas de la superficie captada. Transmite pulsos cortos de energía de frecuencias de radio, en vez de ondas continuas. La antena del SLAR es usualmente larga y delgada, montada con su eje paralelo a la dirección de movimiento de la plataforma. Observa únicamente hacia un lado (de ahí su nombre) eliminando la ambigüedad "lado a lado" en relación con el retraso del pulso a la posición del objetivo, que de otra forma ocurriría.

La resolución R_a en la dirección paralela a la dirección de movimiento de la plataforma (acimutal) se logra en virtud de la longitud L de la antena y queda representada del siguiente modo:

$$R_a = \frac{H\lambda}{(L\cos\theta)},$$

donde θ es el ángulo de incidencia, λ es la longitud de onda y H es la distancia a la superficie.

La resolución perpendicular (alcance) R_r queda determinada por la longitud del pulso τ del radar. La condición para resolver dos puntos es que su distancia del radar difiera al menos en cτ/2, por lo que R_r se puede expresar como:

$$R_r = \frac{c\tau}{(2\sin\theta)}$$

Es posible notar que la resolución R_r, si el ángulo de incidencia θ no es muy pequeño, puede ser de decenas de metros o menos y que es independiente de la altitud H de la plataforma. Por otro lado, la resolución acimutal R_a es proporcional a H, por lo que aunque el sistema SLAR puede lograr una resolución adecuada para imágenes tomadas desde plataformas aéreas, puede ser inadecuada desde plataformas satelitales. Esta fue una de las razones para el desarrollo de los sistemas SAR.

La técnica del radar de apertura sintética supera la dificultad de la dependencia con la altitud H de la R_a del SLAR.

En su apariencia externa, un sistema SAR es indistinguible de un SLAR. Ambos funcionan con la misma geometría y utilizan el mismo principio de emisión de pulsos cortos y análisis de la señal de retorno por retraso temporal para obtener resolución en la dirección de alcance. El SAR, sin embargo, posee una R_a más alta gracias a un procesamiento más sofisticado de la señal de retorno.

A diferencia del SLAR, el SAR implícitamente aprovecha el movimiento de la plataforma para lograr una alta resolución en la dirección acimutal. Dado que la señal regresada a la antena, la amplitud y la fase quedan registradas sobre un intervalo de tiempo T, en principio debe ser posible reconstruir la señal que hubiera sido obtenida con una antena de longitud vT, siendo v la rapidez de la plataforma. Dado que T puede agrandarse, esta "apertura sintética" será grande también, logrando una alta resolución.

Otra forma de ver esto es considerar que esta técnica es esencialmente la misma del procesamiento Doppler. Una coordenada cualquiera en la dirección

acimutal sobre la superficie tendrá una variación temporal única de la frecuencia Doppler asociada a ella. Esta componente puede ser obtenida siempre y cuando la amplitud y la fase de la señal de retorno hayan sido registradas. El proceso puede repetirse para otro valor en la dirección acimutal y así sucesivamente.

Aplicaciones

En esta sección se mencionan las principales aplicaciones de los sensores remotos mencionados en la apartado anterior, en diversas disciplinas de la investigación científica.

Fotografía aérea

Las aplicaciones de la fotografía aérea son bien conocidas en general y, con excepción del uso de la película infrarroja, la correspondencia entre la imagen fotográfica y la percepción proporcionada por el ojo y cerebro humanos es lo suficientemente grande que permite una interpretación intuitiva en muchas aplicaciones. Las principales ventajas de la fotografía, como una técnica de percepción remota, son que es controlable y barata, y que los sistemas ópticos fotográficos pueden ser hechos con suficiente precisión para obtener información espacial cuantitativa de las imágenes resultantes. De esta manera, la fotografía tiene una gama amplia de aplicaciones en mapeo y levantamientos, por ejemplo en geología e hidrología, en análisis de terreno, mapeo de campo, planeación regional, en el estudio de tipos y enfermedades de cultivos, etc. La película de color ha sido también ampliamente utilizada especialmente en estudios de vegetación (*e. g.*, agricultura, estudios forestales, ecología) en geomorfología, hidrología y oceanografía.

La película del infrarrojo cercano en blanco y negro ha sido muy útil en estudios de humedad del suelo y erosión y en levantamientos arqueológicos. Por su parte, la película infrarroja de falso color se ha aplicado en la clasificación de áreas urbanas, en el monitoreo de la humedad del suelo, en el censo de animales, en la evaluación de desastres y, en particular, en el mapeo de la vegetación (Yost y Wenderoth, 1967).

Imágenes en el visible e infrarrojo cercano

Las imágenes del visible e infrarrojo cercano, usualmente con valores de brillo cuantitativos y calibrados, poseen una enorme aplicación en estudios de percepción remota. Parte de esta popularidad puede atribuirse a la relativa facilidad con que estos datos pueden ser interpretados, toda vez que el intervalo de longitudes

de onda corresponde, en un alto porcentaje, con el intervalo de sensibilidad del ojo humano y también porque, en gran medida, muchos procesos importantes modulan la brillantez en este intervalo de longitudes de onda.

El desarrollo de la biomasa (materia orgánica total por unidad de área de la superficie terrestre) puede ser monitoreada en conjunción con datos del infrarrojo térmico. La capacidad para observar cambios en la extensión y el estado de salud de la vegetación es importante tanto por la estimación comercial de la cosecha de los cultivos, como por la predicción oportuna de sequías y problemas de plagas y salud (Figura 4).

De manera similar, es posible distinguir diferentes tipos de árboles en estudios forestales y hacer una evaluación global del estado de la vegetación (Justice *et al.*, 1985).

Es posible monitorear regiones cubiertas con hielo y nieve y, por ende, estimar la cantidad de escurrimientos durante la época de deshielo. Como apoyo en la distinción entre nubes y nieve, se ha utilizado la banda 1.5-1.8 μm, dado que las nubes poseen un albedo más alto que la nieve en esta región espectral (Crane y Anderson, 1984).

Es posible estimar la profundidad de cuerpos de agua someros comparando las intensidades de la radiación que llegan al detector en cada una de las bandas espectrales empleadas. Este método se basa en las variaciones del coeficiente de

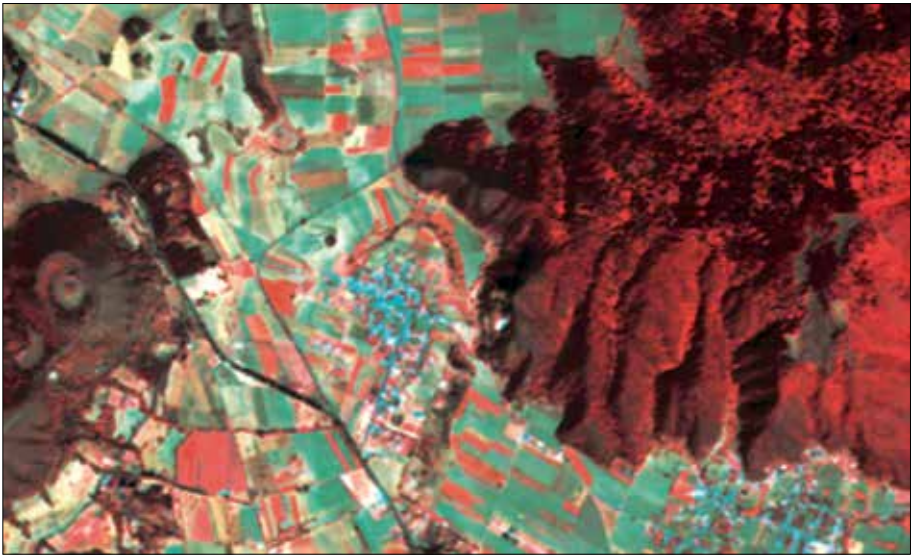


Figura 4. Imagen SPOT en falso color del sureste de la Sierra Nevada, D. F.

atenuación en función de la longitud de onda, aunque, debido a la incertidumbre asociada con el coeficiente, este método requiera calibración. Las bandas espectrales que mejores resultados han proporcionado en esta aplicación son las ubicadas en el verde y en el infrarrojo cercano, dado que proporcionan la diferencia más grande en la atenuación.

Las concentraciones del fitoplancton marino, de las cuales se pueden inferir zonas potenciales de pesca, se calculan a través del aumento en la reflectancia, causada por la presencia de clorofila en el intervalo 0.4-0.5 μm. Esta señal es muy pequeña por lo que es indispensable la utilización de instrumentos muy sensibles (*e. g.* CZCS, SeaWiFS, MODIS) y una corrección cuidadosa de los efectos atmosféricos. La estimación de la concentración de clorofila en mar abierto es usualmente muy precisa por un factor de dos (aguas caso 1). Sin embargo, en aguas someras la presencia de sedimentos suspendidos (aguas caso 2), especialmente aquéllos con una reflectancia importante en la banda amarilla, complica los cálculos (Robinson, 1985).

Las nubes pueden delinearse y ser monitoreadas, midiendo la cobertura nubosa, su altura y su tipo, y aplicar estos parámetros en la predicción del tiempo. Esto es especialmente cierto para sensores con un ancho de barrido amplio, tales como los transportados en satélites meteorológicos en órbita polar y, especialmente, en los satélites geoestacionarios. De esta manera, haciendo un seguimiento del movimiento de las nubes, es posible estimar la velocidad del viento (Warren y Turner, 1988).

Las aplicaciones principales de las bandas del visible e infrarrojo cercano se muestran en la tabla siguiente:

Banda espectral	Aplicaciones
0.4-0.5 μm	Mapeo de la distribución de clorofila y aguas costeras; discriminación entre árboles perennifolios y caducifolios; determinación de tipos de suelos.
0.5-0.6 μm	Batimetría; monitoreo de sedimentos marinos y salud de la vegetación.
0.6-0.7 mm	Discriminación entre especies vegetales; mapeo geológico y aspectos culturales.
0.7-0.8 mm	Levantamiento de biomasa; mapeo y monitoreo de vegetación; discriminación de la frontera agua / tierra.
0.8 - 1.1 mm	Mapeo de vegetación.
1.6 - 1.8 μm	Medición del contenido de humedad de la vegetación; discriminación entre nube y nieve.

La mayor parte de los sensores han utilizado esta división en sus aplicaciones (MSS, TM, HRV), otros más poseen bandas espectrales más angostas (SeaWiFS).

Imágenes en el Infrarrojo térmico

En las imágenes del infrarrojo térmico se utilizan principalmente dos intervalos: la banda de 3 a 5 μm y la banda de 8 a 14 μm. Estas regiones están separadas por la banda de absorción del vapor de agua atmosférico ubicada a los 5-6 μm. Cada una de las bandas térmicas posee sus rasgos característicos (Stewart, 1985). Así, la banda 3-5 μm es más sensible a los cambios en temperatura alrededor de los 300 K, dado que su sensibilidad térmica intrínseca es más grande a las 4 μm que a las 10 μm; asimismo, esta banda ha sido útil en estudios de volcanes y de temperatura superficial del mar en la noche.

Por otro lado, la banda 8-14 μm es usada con mayor frecuencia dado que la contribución de la luz solar reflejada es mucho menor en esta región; además, en esta banda se localiza el pico del espectro de radiación de cuerpo negro para temperaturas entre 210 y 360 K (de -70 a 90° C), que abarca las temperaturas superficiales de emisión del planeta.

Grosso modo, se pueden clasificar las aplicaciones del infrarrojo térmico en percepción remota en aquéllas en las cuales la temperatura superficial está dominada por fuentes de calor antropogénicas (*e. g.* incendios, industrias) y aquéllas en las cuales la temperatura superficial está dominada por la radiación solar. En el primer caso, la técnica ha sido empleada desde plataformas aéreas para determinar pérdidas de calor en edificios y otras estructuras de ingeniería. Es más útil realizar observaciones de estos casos justo antes del amanecer, para evitar los efectos del calentamiento solar diferencial.

En el segundo caso, la percepción remota del infrarrojo térmico ha sido usada para identificar la humedad del suelo y medir el *stress* de agua para identificar tipos de cultivos, entre otros casos. Sin embargo, hay dos tipos importantes de aplicaciones: la medición de la temperatura superficial del mar (TSM) y la identificación de materiales geológicos por su inercia térmica. La temperatura superficial del mar es una cantidad de obvia importancia para estudios oceanográficos y meteorológicos. Puede ser deducida de manera directa a partir de datos del infrarrojo térmico calibrados, dado que la emisividad ε de una superficie de agua pura es una cantidad bien definida con un valor de 0.993. No obstante, las mediciones deben considerar dos aspectos fundamentales: *a)* la señal infrarroja térmica da información de la superficie únicamente a una profundidad del orden de la longitud de atenuación ($\approx$ 0.1 mm) y los oceanógrafos desean conocer la temperatura a profundidades mayores que esto. Hay evidencia de que la temperatura a pocos centímetros de la superficie puede ser 0.5 K más caliente que en la

superficie (Robinson, 1985); *b)* la atenuación atmosférica no es completamente despreciable en esta banda y puede modificar la señal térmica.

Finalmente, se mencionará que la aplicación de técnicas para la detección de radiación térmica en el terreno ha sido considerada también en estudios arqueológicos (Tabbagh, 1973).

Radiometría de microondas pasivas

Los radiómetros de microondas pasivas generan una señal que depende de la temperatura de brillo del objetivo. La temperatura de brillo T_b se relaciona con la temperatura física T_p del siguiente modo:

$$T_b = \varepsilon T_p$$

El uso principal de los datos de los radiómetros de microondas pasivo ha sido la medición de la temperatura superficial del mar, lo cual se puede lograr con una precisión absoluta de aproximadamente 1 K y una precisión relativa de 0.2 K. Dado que en la región de las microondas, la T_b está influenciada no sólo por la T_p sino también por la frecuencia de observación, la salinidad y el estado de la superficie (por sus efectos en la emisividad), es necesaria una observación a varias frecuencias para hacer una determinación precisa de la TSM. La longitud de atenuación para las microondas en el agua de mar es de 1 cm, lo cual es considerablemente mayor que en la banda del infrarrojo térmico.

La radiometría de microondas pasivas ha sido usada sobre superficies oceánicas para determinar la rapidez del viento, con una precisión de cerca de 2 ms^{-1}. El método se basa en la influencia de la rapidez del viento sobre la rugosidad de la superficie y, por tanto, en su emisividad. Las salinidades pueden también determinarse mediante su efecto en la emisividad, pero restringido a plataformas aéreas. La razón para esto es que la sensibilidad a la salinidad ocurre sólo a frecuencias por debajo de los 2 GHz, y una antena operando a estas bajas frecuencias necesitaría ser muy grande para obtener una resolución espacial útil.

En el aspecto meteorológico, con esta técnica se pueden medir varios parámetros meteorológicos de utilidad: la TSM, la rapidez del viento sobre el océano, ya mencionados, pero si el instrumento es puesto a tono a una de las bandas de absorción atmosférica que contenga vapor de agua, se pueden determinar el contenido de agua líquida en nubes, la tasa de lluvia y los perfiles de temperatura atmosférica.

El uso del radiómetro de microondas pasivo sobre las superficies terrestres tiene más complicaciones, excepto para plataformas aéreas de baja altitud. Esto

se explica por el gran ancho de banda angular de este tipo de sistemas, los cuales dan "huellas" de alrededor de 100 km desde satélites. Una característica de huellas tan grandes es que la señal contiene un amplio rango de materiales con emisividades diferentes y, por consiguiente, la interpretación de las observaciones es complicada. Una discusión más amplia sobre este tópico se halla en Elachi, (1987).

Altimetría de radar

La señal de un altímetro de radar se ha utilizado para deducir la distancia H a la superficie y también para deducir la distribución de alturas de las superficies. De la distancia H se obtiene la elevación de la superficie si se conoce la posición de la plataforma. Dado que el rango intrínseco de precisión de un altímetro puede ser mejor a 1 m, es necesario conocer la posición de la plataforma con esta precisión para hacer el mejor uso posible de los datos. Asimismo, es necesario conocer la rapidez a la cual viajan los pulsos de radar a través de la troposfera y la ionosfera. En este aspecto, la contribución troposférica ha sido modelada con una precisión adecuada, pero la contribución ionosférica depende, de manera impredecible, de la hora del día, del año y del ciclo de manchas solares y de la latitud geomagnética. A continuación se ilustra el uso del altímetro con dos ejemplos: mapeo topográfico y medición de la rugosidad de la superficie.

Las mediciones topográficas usando altímetros han sido utilizadas para determinar la forma del geoide sobre los océanos. El geoide es la superficie que conecta puntos con el mismo potencial gravitacional, cuando se han eliminado los efectos de mareas, vientos, corrientes oceánicas y variaciones en la presión atmosférica. En regiones cubiertas por agua, el geoide es la topografía promedio de la superficie. La forma del geoide es aproximadamente un elipsoide de revolución. Las mareas, las corrientes oceánicas introducen variaciones topográficas las cuales son, en general, del orden de 1 m, por lo que un altímetro con un intervalo de resolución de pocos metros es capaz de proporcionar la geometría del geoide.

Para medir el perfil cuasi-estático de la superficie del océano, el cual está sujeto a las variaciones periódicas de las mareas, estas variaciones deben promediarse a menos que la precisión del altímetro no sea lo suficientemente grande para detectarlas. Esto hace necesaria la repetición de observaciones en una misma región de la superficie.

El perfil de la superficie oceánica promedio, medida por el altímetro del SeaSAT o del ERS, ha permitido observar variaciones en la altura en las corrientes marinas (la superficie se inclina debido a la fuerza de Coriolis, un efecto conocido como balance geostrófico), y las manifestaciones en la superficie de la topografía

del lecho marino. La superficie oceánica sobre una trinchera submarina profunda se hunde alrededor de 15 m (Apel, 1983).

La medición de la topografía en tierra es difícil de realizar desde plataformas satelitales. Esto se debe al hecho de que la distancia H a la superficie cambia muy rápido en todo el terreno, excepto en las regiones más planas, lo que presenta varias dificultades técnicas asociadas con el seguimiento del pulso de retorno y el registro de sus variaciones en el tiempo.

La altura significante de las olas (SWH, por sus siglas en inglés) se puede determinar mediante un altímetro de radar. Esta información es útil en sí misma, y puede utilizarse también para estimar la rapidez del viento si se conoce la distancia sobre la cual actúa el viento en la superficie acuática (*fetch*). Una combinación de la altimetría y la radiometría pasiva de microondas es capaz de determinar no sólo la SWH, sino también si el mar está "totalmente desarrollado", es decir, si un aumento en el *fetch* produce un aumento en la SWH. La medición de la rugosidad de la superficie también ha sido realizada sobre áreas desérticas donde la SWH es reemplazada por un parámetro similar definido como altura significativa de la duna.

Escaterometría sobre la superficie marina

La principal aplicación de la escaterometría marina es la determinación de la velocidad del viento (rapidez y dirección). Esta medición es similar a la deducción de la rapidez del viento a partir de la SWH, hecha con un altímetro. El método está basado en un modelo que relaciona la rugosidad de la superficie marina con la rapidez del viento. La rugosidad es anisotrópica, como se esperaría dado que las crestas y los valles de las olas tienden a ser perpendiculares a la dirección del viento, y esta es la clave para determinar la velocidad del viento. Dado que las propiedades estadísticas de la superficie oceánica son simétricas en relación con la dirección del viento, se requieren dos o tres observaciones a diferentes valores de observación acimutal, para determinar la dirección del viento.

Es posible determinar la rapidez del viento con una precisión mejor a los 2 ms^{-1} y direcciones a 20°, usando escaterómetros de los satélites ERS-1 y ERS-2.

La escaterometría sobre superficies terrestres ha sido ampliamente utilizada para caracterizar materiales geológicos, usando las variaciones de $\sigma°$ con el ángulo de incidencia θ como una firma de la misma manera que los materiales son identificados en la banda visible por su firma espectral. Esta técnica ha sido utilizada para estudiar la superficie de los suelos, midiendo principalmente su contenido de humedad, rugosidad y textura. La escaterometría en tierra ha hallado una importante aplicación en estudios de vegetación, particularmente en cultivos y bosques. Este tipo de estudios presenta problemas teóricos importantes

en virtud de su geometría y de su comparativamente estructura abierta, con el volumen significativo, la superficie de dispersión y, en algunos casos, con la dispersión del terreno. En los últimos años ha sido posible monitorear la extensión y la salud de las especies vegetales utilizando esta técnica; sin embargo, persisten problemas de interpretación, dada la similitud de los valores de $\sigma°$ en la vegetación y otros materiales.

Imágenes de radar

Las imágenes del SLAR y del SAR se producen, generalmente, en un formato similar al de una fotografía aérea en blanco y negro, y la brillantez de la imagen desplegada estará en función del valor de $\sigma°$. Tales imágenes pueden ser visualmente interpretadas solas o en pares estereoscópicos. Pueden también ser analizadas con técnicas de procesamiento digital, permitiendo obtener la naturaleza cuantitativa de los datos.

Las imágenes de radar, ya sea SLAR o SAR, están moduladas por los mismos procesos que gobiernan los datos del escaterómetro, y por tener aplicaciones en los mismos tópicos, sin embargo, aplican las ventajas usuales de considerar la imagen como un arreglo bidimensional de datos. La imagen puede ser evaluada y clasificada visualmente y hallar relaciones espaciales en ellas. Los efectos geométricos y topográficos tales como luces, sombras y el fenómeno óptico de coherencia, pueden complicar el análisis de la imagen, así como también la dispersión volumétrica puede contribuir en forma significativa a la señal detectada. La complejidad de analizar las imágenes de radar requiere del empleo de técnicas sofisticadas y de la experiencia del intérprete. El análisis de las primeras imágenes de radar demanda el uso de computadoras de gran velocidad, como la CRAY o la Kan-Balam. Hoy en día, sin embargo, pueden procesarse en computadoras relativamente convencionales.

Por otro lado, la disponibilidad de datos de retrodispersión calibrados, posiblemente a varias polarizaciones y frecuencias ofrece un potencial enorme. Cuando esta disponibilidad se conjuga con el hecho de que las imágenes de radar no son afectadas por la oscuridad (al ser sensor activo) ni por las condiciones meteorológicas, hacen esta técnica muy atractiva.

Las imágenes de radar han sido utilizadas en la exploración geológica, en aplicaciones de mapeo geomorfológico (Trevett, 1986). Asimismo, se han utilizado en estudios de suelos y su contenido de humedad, en estudios de las condiciones de los cultivos y de otros tipos de vegetación. La radiación de microondas puede penetrar distancias significativas en superficies áridas. Una de las primeras

aplicaciones de las imágenes SAR fue revelar antiguos cauces de agua en el desierto del Sahara.

Las aplicaciones en oceanografía son también amplias. El campo de oleaje superficial es detectado con claridad, a pesar de los problemas de ruido en la imagen, o en la deducción del espectro de potencia de las olas a partir de las imágenes SAR. Mediante estas imágenes es posible detectar la difracción de las olas por las características de las costas, y también la refracción de las olas por las variaciones de la topografía del fondo. Con estas imágenes es posible la detección de ondas internas y la presencia de hidrocarburos y de grasas animales en el océano (Figura 5).

La aplicación de imágenes de radar en la detección de zonas urbanas ha sido posible, gracias a la geometría de calles y arquitectura de las ciudades, dado que las construcciones generan una fuerte señal de retorno al sensor.

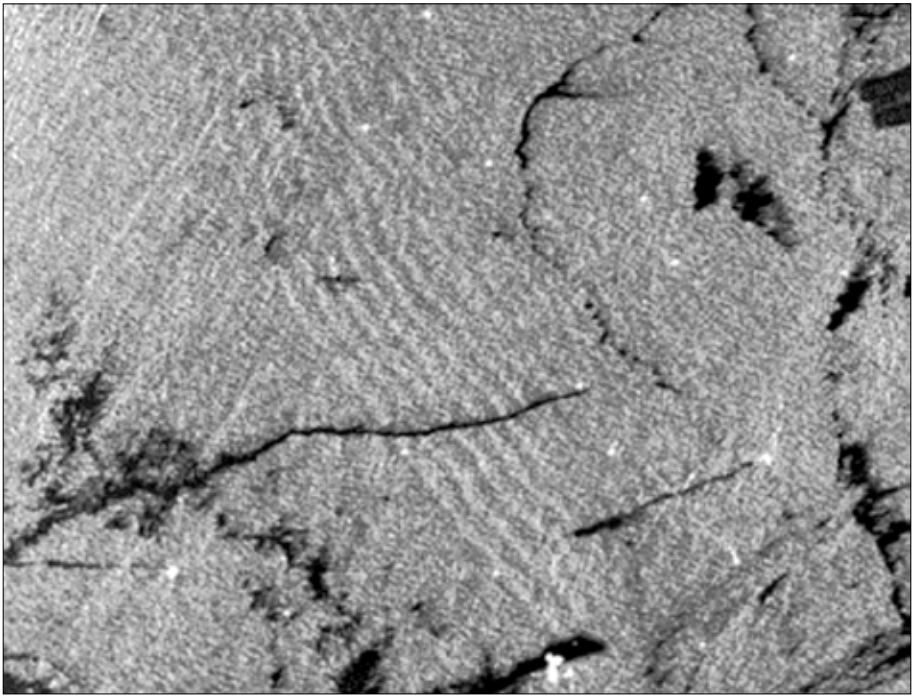


Figura 5. Imagen SAR mostrando el patrón de oleaje y derrames de hidrocarburos en tonos oscuros.

Referencias

Abell, G. O. (1975), *Exploration of the Universe*, third edition Holt, Rinehart, Winston.

Apel, J. R. (1983), "A survey of some recent scientific results from the SEASAT altimeter", in *Satellite Microwave Remote Sensing*, T. D. Allan, Ellis Horwood, Chichester.

Colwell, R. N. (1983), *Manual of Remote Sensing*, 2nd. edition, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia.

Cracknell, A. P. (1981), *Remote Sensing in Meteorology, Oceanography and Hydrology*, Ellis Horwood, Chichester.

Crane, R. G. and M. R. Anderson (1984), "Satellite discrimination of snow/cloud surfaces", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 5, p. 213.

Elachi, C. (1987), *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*, Wiley-Interscience, New York.

Justice, C. O., J. R. G. Townshend, B. N. Holben and C. J. Tucker (1985), "Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, p. 1271-1318.

Lindenlaub, J. C. (1976), *Remote Sensing: What is it?*, *Fundamentals of Remote Sensing*, Purdue Research Foundation.

Measures, R. M. (1984), *Laser Remote Sensing.*, Wiley, New York.

Robinson, I. S. (1985), *Satellite Oceanography*, Ellis Horwood, Chichester.

Schanda, E. (1986), *Physical fundamentals of Remote Sensing*, Springer-Verlag, Berlin.

Stewart, R. H. (1985), *Methods of Satellite Oceanography*, University of California Press, Berkeley, California.

Tabbagh, A. (1973), "Essai sur les conditions d'application des mesures thermiques a la prospection archéologique", *Annales de Géophysique*, vol. 29, p. 2.

Trevett, J. W. (1986), *Imaging radar for resources survey*, Chapman and Hall, London.

Warren, D. and J. Turner (1988), "Cloud track winds from polar orbiting satellites", in *Proceedings of the 1988 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, ESA SP-284, European Space Agency, Paris, p. 549.

Yost, E. F. and S. Wenderoth (1967), "Multispectral colour aerial photography", *Photogrammetric Engineering*, vol. 33, p. 1020.

Capítulo 2. Los Modelos Digitales de Terreno. Descripción e interpolación

Jean-François Parrot
Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE)
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Los Modelos Digitales de Terreno (MDT) se utilizan cada vez más en el campo de las Geociencias. Desde 1958, Miller y Laflamme (1958) establecen los primeros principios del uso de los modelos digitales para el tratamiento de problemas tecnológicos, científicos y militares. Existen diferentes definiciones de dichos modelos. Doyle (1978) los considera como un conjunto de datos numéricos que describen, la distribución espacial de una característica del territorio. Para Burrough *et al.* (1988), el MDT consiste en una representación de la variación del relieve en el espacio de una matriz regular. Otros autores (Peuker *et al.*, 1978; Douglas, 1986) se refieren a modelos más complejos incluyendo las líneas de cresta y la red fluvial. De manera general, se consideran a los MDT como una representación digital que contiene información altimétrica o como una representación de la superficie topográfica. El objetivo de un MDT consiste en la descripción numérica lo más preciso posible de la forma y de la posición de una porción del terreno utilizando un número fijo de puntos de muestra. En realidad, la representación de una superficie terrestre puede requerir una infinidad de puntos y así un almacenamiento enorme de memoria. Producir un MDT consiste en elegir el muestreo, el tipo de malla, la escala y el método de interpolación en función del uso de éste.

Entre los diferentes métodos de interpolación para crear modelos digitales de terreno, se destacan el *kriging* (krigeado) que se basa sobre los principios estadísticos de estimación (Matheron, 1969); los interpoladores polinomiales como los splines lámina-delgada (Duchon, 1976; Dubrule, 1984; Mitasova y Hofierka, 1993; Mitasova y Mitas, 1993; Julien, 1994), la dilatación de curvas propuesta por Taud *et al.* (1999), la interpolación multi-direccional dentro de capas de altitud (Parrot y Ochoa, 2005), los métodos de correlación automática que permiten

crear un MDT a partir de una pareja de imágenes aéreas o satelitales (Guichard *et al.*, 1988; Hottier y Albattah, 1991; Julien, 1988).

En el sub-capítulo siguiente se presentarán los tipos de modelos digitales existentes. La digitalización de los datos que requieren las interpolaciones (Parrot y Ochoa, 2005) se discutirá más adelante. Antes de presentar información sobre las diferentes interpolaciones concernientes a los MDT de tipo raster, se proporcionarán elementos de base sobre el mundo raster y los datos informáticos, lo que permite entender las características de dichas interpolaciones. La problemática de los artefactos provenientes de uno u otro tipo de interpolación se trata en un apartado especial, así como la manera de mejorar el MDT.

Tipos de Modelos Digitales de Terreno

Existen principalmente dos tipos: *a)* una estructura irregular, llamada TIN (*Triangulated Irregular Network*) y *b)* una malla regular llamada "raster". Es una matriz donde cada celda corresponde a un dato de altitud.

Modelo TIN

El MDT vector o TIN (Peucker *et al.*, 1978) se construye como un grafo compuesto con identidades de base: el punto, el nudo, el segmento, el arco y el campo. Los objetos están relacionados topológicamente entre ellos.

El modelo TIN corresponde a un grafo simplificado: los arcos unen dos nudos y los campos corresponden a triángulos definidos por tres arcos. La información métrica está únicamente sostenida por los puntos (Figura 1).

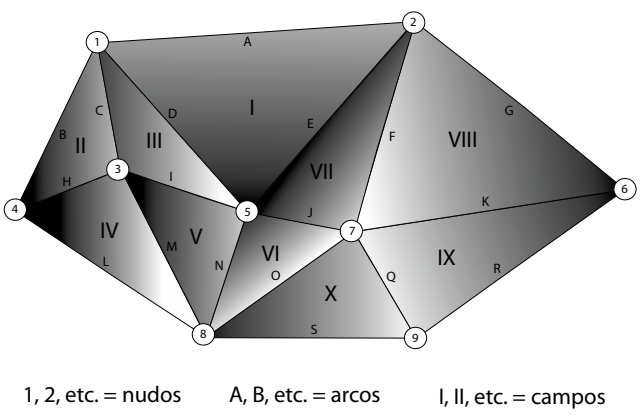


Figura 1. Esquema que representa un TIN.

Son datos que se pueden integrar directamente en un SIG. Las operaciones espaciales como la translación, la rotación, los cambios de escala se hacen fácilmente. El espacio donde los puntos (x, y, z) están registrados corresponde a un espacio tridimensional real. El volumen de los datos es relativamente pequeño.

Pero, al contrario del MDT raster, donde cada punto de la matriz está relacionado con un atributo (valor) como la radiometría, la altitud, la pendiente, etc., el cruce de dos TIN es difícil, porque estos valores se encuentran en los nudos o en los arcos, por lo que requiere de rutinas complejas que necesitan mucho tiempo de ejecución.

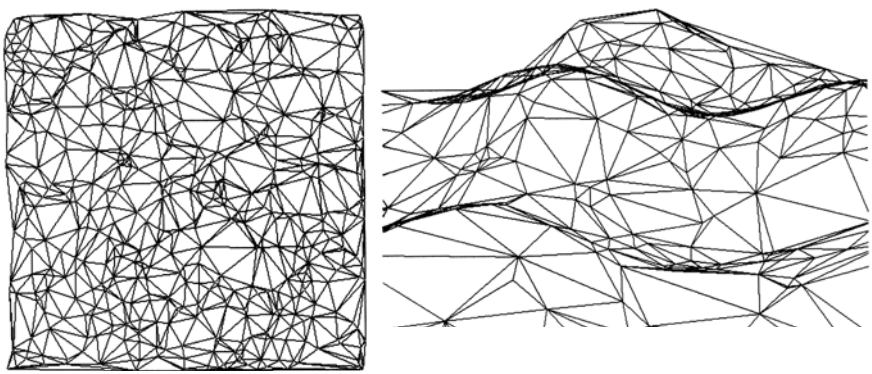


Figura 2. Representación de una red de puntos triangulados A. Vista en plano y B. Vista en perspectiva en Baudemont (1999).

Modelo Raster

Un MDT de tipo raster tiene las mismas propiedades que una imagen y está perfectamente adaptado a las herramientas utilizadas en el tratamiento clásico de imágenes; sin embargo, no permite hacer una descripción completa en un espacio tridimensional. Peet y Sahota (1985) consideran una imagen y todos los datos raster como una superficie bi-dimensional en un espacio tridimensional. En el caso de los MDT, los valores de la imagen no corresponden a valores radiométricos, pero sí altimétricos. La superficie descrita en un MDT raster se puede explicar con la siguiente función: $z = f(x,y)$. Los MDT raster tienen muchas ventajas. Se extraen rápida y fácilmente los productos derivados de la superficie como son: la sombra, la sombra proyectada, la hipsometría, las pendientes, entre otros, y también se pueden combinar y cruzar datos de distinto origen.

Sin embargo, un MDT raster no corresponde totalmente a un espacio 3D porque, como se mencionó anteriormente, cada punto (*x, y*) tiene sólo un valor altimétrico. En geociencias cuando se modelan estructuras 3D (pliegues por ejemplo), se utilizan de preferencia modelos TIN (Raper, 1989; Van Driel, 1989; Figura 3).

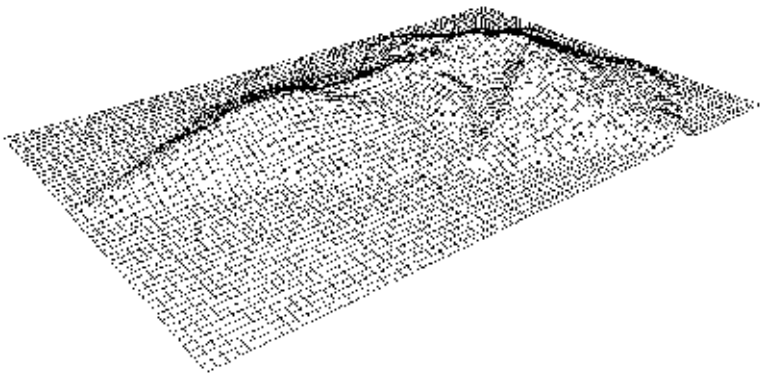


Figura 3. Ejemplo de un MDT raster. Isla de Palma (Canarias) en Baudemont (1999).

Digitalización

Los datos que se emplean para producir un MDT pueden provenir de curvas de nivel digitalizadas, de puntos acotados, o de imágenes aéreas o satelitales.

La digitalización de las curvas de nivel se puede hacer de manera vectorial o en el espacio raster. Un manual relativo a esta última técnica se encuentra en la colección Geografía para el Siglo XXI del Instituto de Geografía (Parrot y Ochoa, 2005). Se explican las reglas fundamentales que permiten generar el MDT a partir de estas curvas y eventualmente, a partir de puntos acotados.

En función de la escala del mapa original y del detalle requerido para el modelo puede digitalizarse la totalidad de curvas o efectuar una selección de las curvas maestras. Las cumbres serán siempre mesetas por encima de la última curva de nivel digitalizada a menos que se introduzcan cotas auxiliares en estas zonas críticas (Oswald y Raestzsch, 1984). Un punto acotado creará dentro de una curva de nivel cerrada o una cima o una depresión tal como un cráter o una dolina (*Ibid.*). Por otro lado, los programas actuales de interpolación admiten la introducción de líneas auxiliares cuando se requiere; de esta manera, se puede obtener una representación más precisa de elementos del relieve como fallas, escarpes, bordes de taludes o acantilados, etcétera.

La calidad requerida para los MDT depende de la problemática científica. Por ejemplo, un MDT proveniente de una triangulación no permitirá extraer de manera satisfactoria la red fluvial o una representación exacta del aspecto. Los *pits* (o pozos) generados a veces por el *kriging* representan artefactos que se deben eliminar anteriormente.

Fundamentos sobre el mundo Raster

En este apartado se presentan algunos elementos que se refieren a la estructura de los datos informáticos, así como a la definición de las relaciones que existen entre los píxeles que son las entidades de base de la malla raster. Estos fundamentos deben ayudar a entender la estructura de los datos y de las características de los elementos que se toman en cuenta para generar un MDT.

En primer lugar, se tratará la numeración, las variables y los formatos, antes de definir las relaciones entre los píxeles y sus vecinos.

Numeración y formatos
Existen diferentes tipos de bases de numeración:

- base sexagesimal [60] (Caldéos ➔ segundos y minutos);
- base vigesimal [20] (medioevo);
- base hexadecimal [16];
- base duodecimal [12];
- base decimal. Invención del cero por los árabes (*sefer* en árabe, dando el nombre "cifra");
- base binaria (utilizada por las computadoras).

En el sistema binario, base de la computación, un grupo de ocho bits constituye 1 byte. Las imágenes en tonos de gris (ASCII) son datos de ocho bits (1 byte); este formato permite registrar 256 tonos de gris (Figura 4).

Por su parte, dependiendo de los intervalos de altitud requeridos y del abanico de los rangos de altitud, un MDT necesitará un formato de 16 bits (2 bytes) o de 32 bits (4 bytes). Por ejemplo, un MDT de dos bytes permite registrar una altitud en metros que va de 0 hasta 65 535, pero si el MDT está en decímetros se requiere un formato de cuatro bytes que permite sobrepasar la altitud de 6 553 metros (65 535 decímetros).

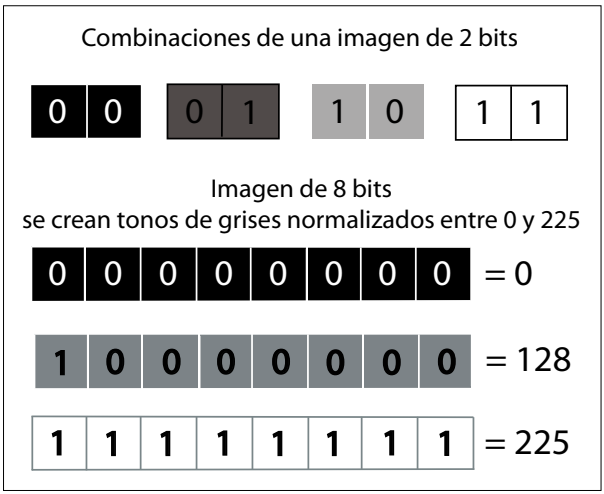


Figura 4. Ejemplo de códigos 2 bits y 8 bits.

Los tipos de variables que se utilizan en los programas de computación son los siguientes:

- unsigned char (0, 255) 1 byte
- char (-128, 127) 1 byte
- unsigned short (0, 65535) 2 bytes
- short int (-32768, 32767) 2 bytes
- int (0,4294967295) 4 bytes
- float 4 bytes
- double 8 bytes

Los píxeles

El píxel corresponde al punto elemental de la malla raster. En función de sus relaciones con los píxeles vecinos se define la noción de vecindad. Se trata de la vecindad 4 cuando el píxel central se une con sus vecinos por los lados, y de vecindad 8 cuando los píxeles se unen por los lados y las esquinas (Figura 5).

Así, la distancia D entre dos píxeles depende de la vecindad. $D = 1$ en el caso de la vecindad 4, y $D = \sqrt{2}$ en el caso de los píxeles ligados por la esquina.

Por ejemplo, el cálculo de la pendiente entre dos píxeles depende de la vecindad de los píxeles involucrados en este cálculo (Figura 6).

Relacionado con la vecindad, se define la noción de camino y de conectividad (4 y 8), (Figura 7):

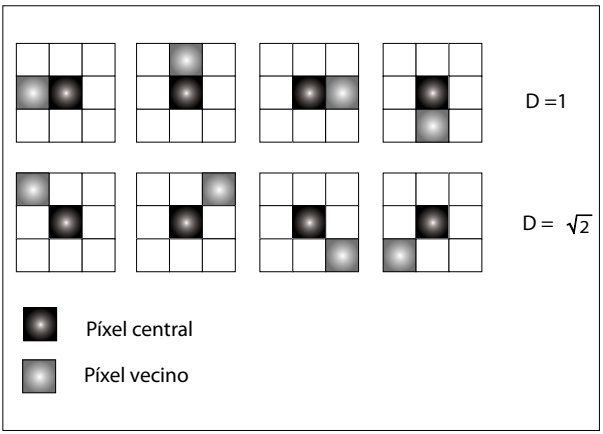


Figura 5. Relaciones entre un píxel y sus vecinos.

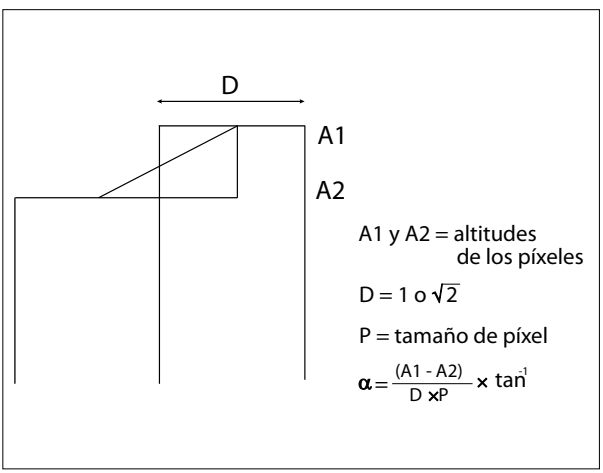


Figura 6. Cálculo de la pendiente entre dos píxeles.

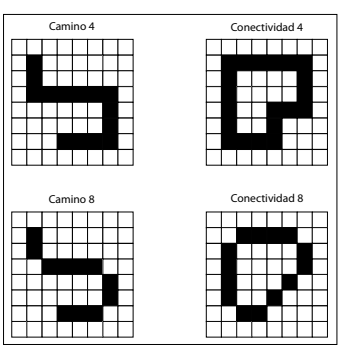


Figura 7. Caminos.

Los algoritmos de relleno dependen de la conectividad (relleno 4 para una forma de conectividad 8; relleno 8 para una conectividad 4).

Nota: algunas veces dos líneas de camino 8 pueden cruzarse sin tocarse.

Para medir la configuración del motivo que dibujan un píxel y sus vecinos, se utiliza una codificación (Figura 8) que expresa todas las combinaciones existentes.

También, este tipo de codificación permite cruzar diferentes temas (Figura 9).

De manera similar se aplica una codificación para establecer la relación topográfica entre dos píxeles. Así, se define el código de Freeman que permite, entre otros, verificar que la línea que une dos puntos corresponde a una línea recta (Figura 10). Esta definición es útil para transferir datos raster a datos vectoriales, o dibujar a partir de los datos vectoriales, curvas en el espacio raster.

Interpolaciones

El resultado de los tratamientos digitales depende del tipo de interpolación que se elige en función de la problemática (Figura 11). Los datos utilizados son: curvas de nivel, imágenes de satélite, puntos de altitud, etcétera.

Los métodos de interpolación más usuales a partir de un conjunto de puntos distribuidos irregularmente pueden reducirse a tres: ponderación en función inversa de la distancia, la triangulación y el *kriging* (o krigeado).

Ponderación en función de la distancia: este método realiza la interpolación asignando un peso a los datos en función inversa de la distancia que los separa del punto estudiado. La fórmula general es la siguiente:

$$\check{Z}\, x, y = \sum_{i=1}^{n} z_i \times d_i^k \Big/ \sum_{i=1}^{n} d_i^k$$

1	2	4
128		8
64	32	16

Figura 8. Códigos de configuración.

La suma de los píxeles vecinos indica cuál es la configuración. Se asemeja a la definición de un byte.

Nota: para todos los píxeles, esta suma es igual a 255.

1+2+4+8+16+32+64+128 = 255

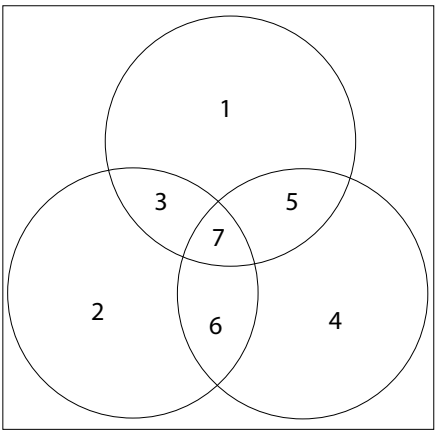


Figura 9. Codificación de los cruzamientos de tema.

Cruzamiento de tres temas:

Tema 1: código 1
Tema 2: código 2
Tema 3: código 4

cuatro posibilidades de cruces

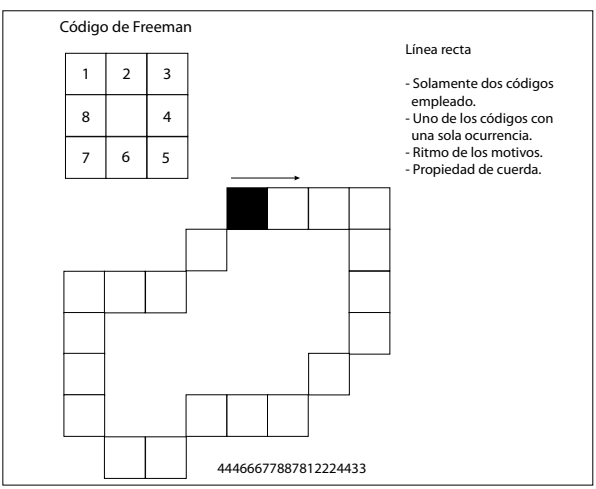


Figura 10. El código de Freeman.

$\check{Z}$ corresponde a la altitud estimada para el punto (*x, y*) en función de los puntos seleccionados en el entorno. *k* permite ponderar la distancia. Por ejemplo, si $k = 2$, la interpolación se realiza en función inversa del cuadrado de la distancia. Este método sencillo y rápido, también conocido como un tratamiento baricéntrico, tiene la desventaja de depender de la distribución de los puntos originales.

Triangulación: aplicando la triangulación (Voronoï, 1908; Delaunay, 1934) y utilizando algoritmos de alta velocidad (Watson, 1981; Tsai, 1993), se obtienen rápidamente superficies triangulares, aunque haya varios puntos de referencia (*x, y, z*). Las mallas raster se diseñan fácilmente a partir del modelo TIN creado

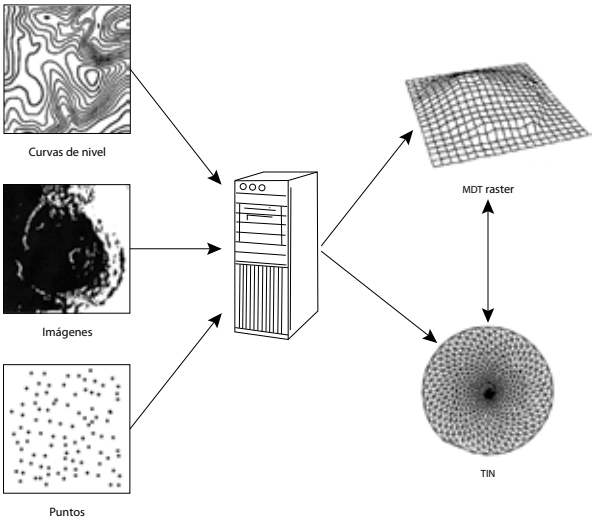


Figura 11. Esquema general de producción de un MDT.

por triangulación, siempre y cuando este método se utilice para un contexto de visualización rápida (simulaciones de vuelo, juegos de video, etc.).

El modelo TIN se adapta a numerosos SIG. Se integra bien en una base de datos SIG y a las manipulaciones espaciales como por ejemplo, las translaciones o los cambios de escala se realizan con facilidad.

El espacio TIN es un verdadero espacio tri-dimensional; cada punto se define a partir de tres coordenadas independientes (*x, y, z*), así, se hace posible estudiar superficies complejas, como los pliegues geológicos y el volumen requerido para los datos es relativamente débil (Berg y Dobrindt, 1998). Sin embargo, el modelo TIN tiene inconvenientes. Es difícil cruzar datos provenientes de diferentes fuentes. En el caso de los datos vectoriales, la información se ubica sobre los puntos y los arcos, de tal manera que se requiere tiempo de cálculo importante cuando se cruzan diferentes tipos de datos, cuando se necesitan extraer las curvas de nivel, etc. Por otro lado, la superficie de un TIN corresponde a una superficie continua, pero no se puede derivar, lo que produce un aspecto visual anguloso. Por esta razón, los MDT obtenidos no permiten analizar y estudiar con precisión el terreno.

Krigeado: desde hace mucho tiempo, la creación de mallas regulares ha sido estudiada a partir de los muestreos (Matheron, 1969; Duchon, 1975; Braile, 1978; De Masson d'Autume, 1978). Desde finales de los años sesenta, Matheron utilizó un método llamado "krigeado" inventado por Krige, un especialista de prospección minera. Este método está basado sobre los principios estadísti-

cos de estimación (variogramas) y realiza una estimación del valor de un punto mediante una media ponderada en función de la distancia. De hecho, puede suponerse que el valor de altitud de un punto se relaciona con el valor de los puntos vecinos distribuidos a distancias variables. Esta dependencia se mide mediante la covarianza del conjunto de puntos. La función que relaciona la covarianza con la distancia se denomina variograma que indica la variación de la correlación entre los datos en función de la distancia (Oliver y Webster, 1990).

Aunque el krigeado es un método de interpolación teóricamente muy recomendable para su inclusión en los SIG (*Ibid.*), algunos autores observan que en la práctica, su eficacia es comparable a la de otros métodos más simples y de menor requerimiento computacional.

El principio fundamental del krigeado considera que la superficie descrita por un MDT verifica algunas propiedades estadísticas. Para que dos puntos P_1 y P_2 pertenezcan a esta superficie, tienen que estar correlacionados o dependientes. Esta dependencia es más fuerte cuando estos dos puntos son vecinos. En este caso, la correlación es homogénea cuando no depende de las posiciones de los puntos y finalmente isótropa, es decir, que no depende de la distancia. Se estiman matemáticamente las propiedades de z^* en función de los puntos vecinos z_P y de los coeficientes λ_P:

$$z^*_P = \sum_{P=1}^{n} \lambda^P z_P ,$$

con valores de λ_P que permiten verificar que:

$$E\,[z^*_P - z_P] = 0$$
$$Var\,[z^*_P - z_P]\ minimum.$$

Dubrule (1984) y Julien (1994) dan las fórmulas para calcular los coeficientes λ_P, pero para definir correctamente z^*_P, se necesita hacer una hipótesis sobre la función $E(z_P)$. El krigeado universal verifica que:

$$E\,(z_P) = \sum_{k=1}^{n} a_k f_k(P) ,$$

donde $f_k(P)$ es una función de datos y a_k son coeficientes

$$E\,(z^*_P) = E\,(z_P) .$$

Si $E\,(z_P) = f_0(P)$, se trata de un krigeado simple.

La mayor desventaja del *kriging* es el número de cálculos que se requieren para ejecutar el tratamiento, y también la creación de artefactos tales como la creación de "pits" cuando un rango de valores no entra en el promedio de los variogramas.

Interpolación bi-cúbica: en este caso se trata de obtener un MDT polinomial de grado 2 (bilineal) o 3 (bicúbico).

$$H(x, y) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} z_{ij} V\left(\frac{x}{h} - i\right) V\left(\frac{y}{h} - j\right),$$

con V una función de interpolación bicúbica y bilineal.

3° grado:

2° grado $\begin{cases} V(t) = 1 - |t| & \text{si } -1 \leq t \leq \\ V(t) = 0 & \text{si no} \end{cases}$

con $m=(x, y)$, $r_{ij} = (i.h, j.k)$, et $u(s, t)=V(s/h, t/h)$.

Pero no existe una solución única que minimiza:

$$G(z) = \sum_{i=1}^{n} p_i^2 (H(m_i) - Z_i)^2 \qquad \text{con } p_i > 0.$$

La malla elástica que consiste en minimizar E(z), asegura una solución única:

$$E(z) = K(z) + G(z)$$

y

$$K(z) = \sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=1}^{M} (z_{i=1,j} - 2z_{i,j} + z_{i+1,j})^2 + \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} (z_{i=1,j} - 2z_{i,j} + z_{i+1,j})^2$$

Por otro lado, como se presenta en los siguientes párrafos, Duchon (1975, 1976) y otros autores (Mitas y Mitasova, 1988; Mitasova y Hofierka, 1993; Mitasova y Mitas, 1993), utilizan los splines (Spline lámina delgada o TPS Thin Plate Spline), para interpolar una superficie más real. La liga teórica entre los dos métodos es muy conocida; la interpolación TPS corresponde a un caso particular de krigeado (Matheron, 1981; Dubrule, 1984).

Spline "lámina delgada": las funciones *spline* "lámina delgada" son funciones spline unidimensionales que minimizan:

$$E(S) = \int S''(t)^2 \, dt$$

Duchon (1976) y Julien (1994) desarrollan la función como sigue:

$$S(m) = \sum_i a_i \|m - m_i\|^2 \ln\|m - m_i\| + b + cx + dy$$

con $m=(x, y)$ *et* $\sum_i a_i m_i = 0$, $\sum_i a_i = 0$

En este caso, *S(m)* es único y corresponde aproximadamente a la energía de la lámina delgada infinita z=S(x, y).

Existen dos versiones:

- el MDT spline lámina delgada de interpolación corresponde a una interpolación porque la superficie resultante pasa por los puntos de muestreo. La expresión de este spline *H(m)* es:

$$H(m) = S(m) = Z_i.$$

Lo que da la expresión matricial siguiente:

$$\begin{Bmatrix} 0 & c_{12} & \dots & c_{1n} & 1 & x_1 & y_1 \\ c_{12} & 0 & \dots & c_{1n} & 1 & x_2 & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{1n} & c_{1n} & \dots & 0 & 1 & x_n & y_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \dots \\ Z_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

con $c_{ij} = \|m_i - m_j\|^2 \ln\|m_i - m_j\|$, $(x_i, y_i) = m_i$

- el MDT spline lámina delgada de ajuste no pasa por los puntos de muestreo.

En este caso:

$$sE(H) + \sum_i (H(m_i) - Z_i)^2$$

es mínimo ($s > 0$), y

$$8\pi\, s\, a_i + H(m_i) = Z_i$$

lo que da en la forma matricial:

$$\begin{pmatrix} 8\pi\, s & c_{12} & \dots & c_{1n} & 1 & x_1 & y_1 \\ c_{12} & 8\pi\, s & \dots & c_{1n} & 1 & x_2 & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{1n} & c_{1n} & \dots & 8\pi\, s & 1 & x_n & y_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \dots \\ Z_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Este método es de implementación matemática fácil pero requiere mucho tiempo de cálculo; se encuentra en el software Surfer y se llama *Radial Basis Functions*.

Otros métodos se basan en la digitalización de las curvas de nivel:

Dilatación de curvas: el método propuesto por Taud *et al*. (1999), utiliza las curvas de nivel y también los puntos acotados; todos se dilatan (Figura 12) hasta que las superficies resultantes de la dilatación se juntan. El límite entre las

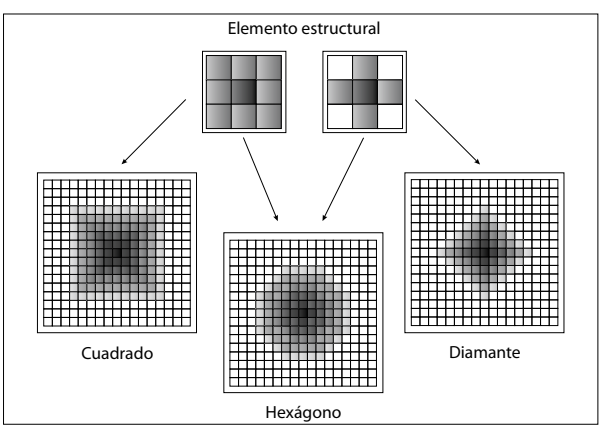


Figura 12. Elementos estructurales de la Morfología Matemática utilizados para dilatar las curvas de nivel.

superficies corresponde a una curva con valor intermedio a ellas (Figura 13) y el proceso se repite hasta llenar el espacio.

Interpolación multi-direccional: el algoritmo **Miel4_mx** (Parrot, 2003 en Parrot y Ochoa, 2005), trabaja por capas comprendidas entre dos curvas de nivel. Las capas corresponden a zonas cerradas y delimitadas dentro de la imagen. Para cada píxel ubicado en una capa se mide el valor de la distancia mínima (d_i) entre este punto y la curva inferior de altitud A_i y su distancia mínima (d_s) con la curva superior de altitud A_s (Figura 14).

El valor de la altitud A_p del píxel $P(i, j)$ es igual a:

$$A_p = A_i + [(A_s - A_i) \times (d_i / d)],$$

donde $d = d_i + d_s$.

Comparación de diferentes interpolaciones

El resultado de los tratamientos digitales depende del tipo de interpolación que se elige en función de la problemática (Figura 15). Los cinco MDT resultan de

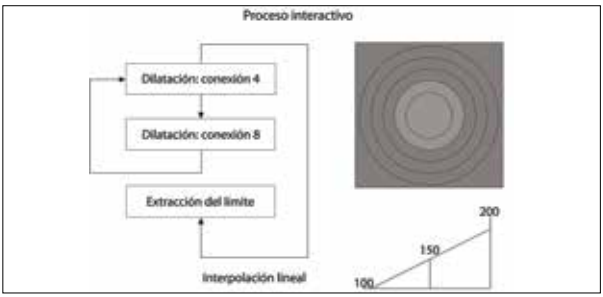


Figura 13. Dilatación y extracción de las curvas de nivel intermediarias.

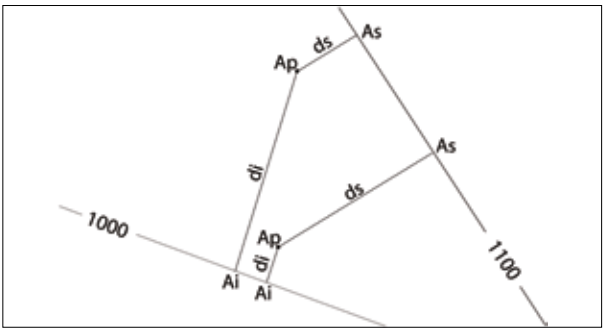


Figura 14. Cálculo de la interpolación lineal entre las curvas 1 000 y 1 100.

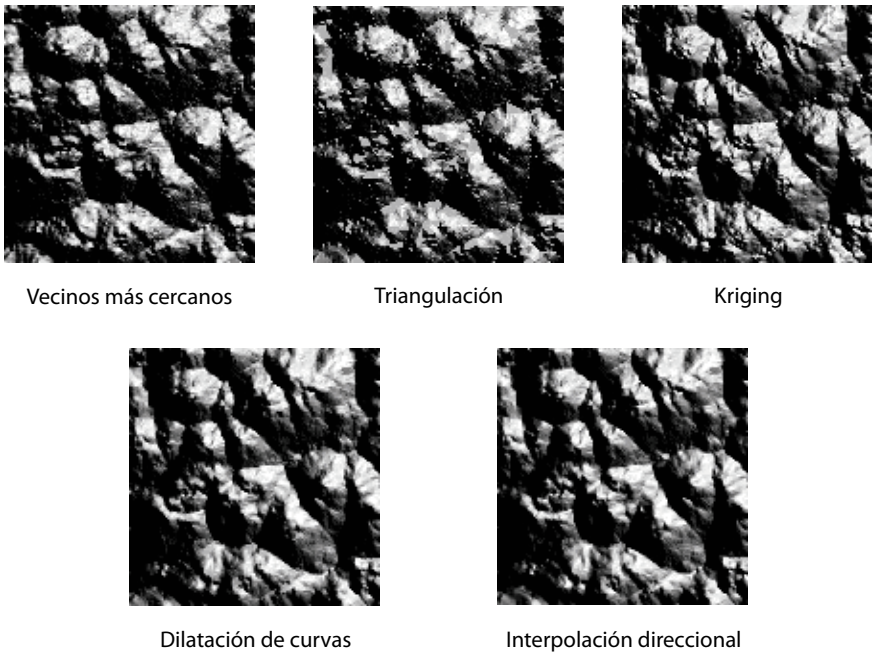


Figura 15. Algunos resultados de interpolaciones.

una aplicación tomando en cuenta un MDT de referencia creado a partir de la dimensión fractal. Los tres primeros (A, B y C) entran en la lógica de los tratamientos aplicados a un conjunto de puntos distribuidos irregularmente. Los dos siguientes (D y E) corresponden a interpolaciones tomando en cuenta las curvas de nivel.

Nótese que los dos últimos (D y E) producen una morfología más suave, sin el aspecto visual anguloso de la triangulación (B) por ejemplo.

El MDT original generado por la dimensión fractal y el posicionamiento aleatorio de los puntos de referencia, corresponde a un MDT que tiene un relieve caótico con muchas irregularidades como picos, huecos, crestas agudas, barrancos estrechos, etc. (Figura 16). Por esta razón, la reconstitución de este relieve representa una dificultad importante, de tal manera que la diferencia entre el MDT original y los MDT provenientes de las diferentes interpolaciones, ilustra el comportamiento de cada algoritmo. Considerando la imagen de la diferencia de altitud como un MDT, puede sombrearse y así visualizar el comportamiento de las interpolaciones (Figura 17). Por ejemplo, en el caso del kriging o de la triangulación, se ve que

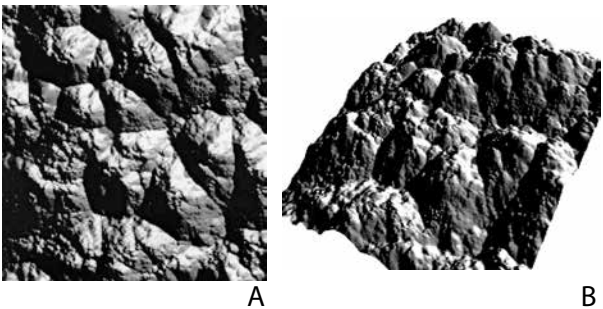


Figura 16. MDT de síntesis.

el tratamiento corta o llena el modelo de manera aleatoria, aun los tratamientos que toman en cuenta las curvas de nivel tienen una tendencia a nivelar el modelo, llenando los barrancos y suavizando las crestas agudas (Figura 17 F).

Por otro lado, las diferencias entre la dilatación de curvas (Taud *et al*., 1999) y la interpolación multi-direccional dentro de las capas de altitud (Parrot y Ochoa,

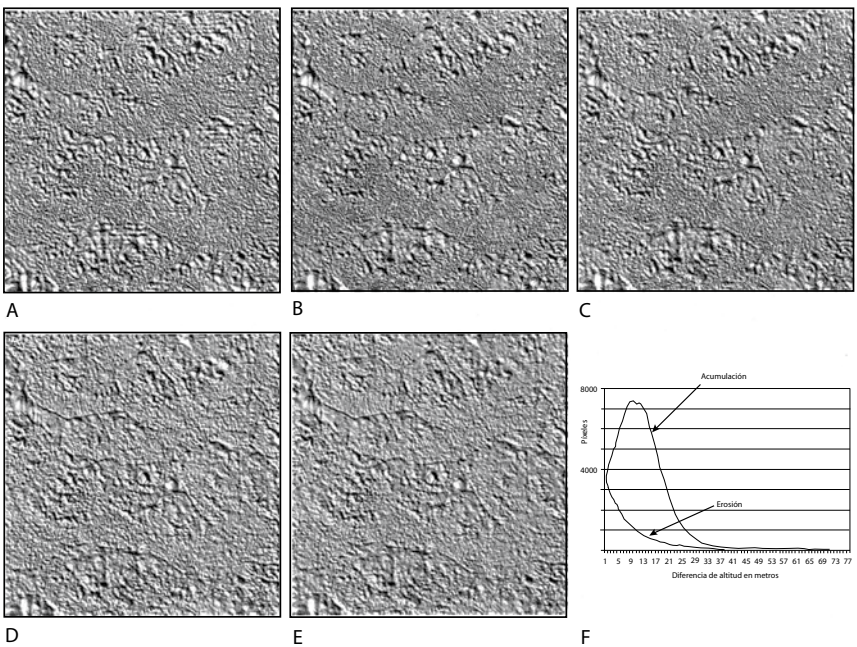


Figura 17. MDT sombreados de la diferencia de altitud entre el MDT original y el resultado de cada interpolación. A. Vecinos más cercanos. B. Triangulación. C. Kriging. D. Dilatación de curvas. E. Interpolación multi-direccional. F. Histograma de las diferencias positivas y negativas (Dilatación).

2005), muestran que la dilatación, aunque capaz de tomar en cuenta puntos acotados y curvas de nivel incompletas, crea en algunos casos, zonas planas cuando los datos son escasos, lo que no se produce cuando se utiliza la interpolación multi-direccional (Figura 18).

La Tabla 1 resume las características de diferentes interpolaciones.

Artefactos y mejoramientos

No existe un interpolador perfecto –cual sea la metodología empleada para generar un MDT, siempre habrán artefactos que se deben analizar y tratar de eliminar–, sino reducir para calcular atributos primarios y secundarios a partir de la superficie del MDT. Aunque la noción de calidad de un MDT sea sobre todo subjetiva, existen investigaciones que dan una respuesta a esta problemática (Hannah, 1981; Lee *et al.*, 1992; Wood y Fisher, 1993; Wood, 1996).

Un modelo digital y la pantalla de la computadora corresponden a un conjunto discreto de puntos, mientras que una superficie y una curva se describen en un espacio continuo. De esta manera se genera el fenómeno del *aliasing*, muy conocido en el campo de los tratamientos de imágenes. La producción de un MDT de calidad es una meta importante cuando se trata de extraer la red fluvial (Lee *et al.*, 1992), el cálculo de la pendiente y del aspecto, etc. La Figura 19 ilustra un artefacto de interpolación proveniente de una dinámica vertical demasiado débil.

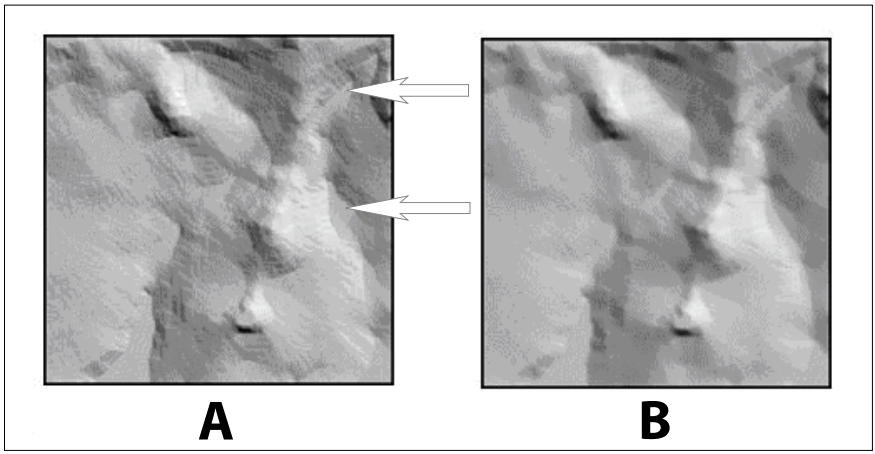


Figura 18. Presencia de zonas planas (flechas) utilizando el algoritmo de dilatación (A). En el caso del uso de la interpolación multi-direccional los cauces se dibujan (B).

Tabla 1. Comparación de cinco métodos de interpolación

Modelo	Datos	Rapidez	Ventajas	Desventajas
Splines	Puntos curva	--	El mejor para obtener MDT de calidad	Lentitud especialmente para archivos de gran volumen.
Triangulación de Delaunay	Puntos Curvas	++++	La más rápida	Presencia de discontinuidades en las derivadas del primer y segundo orden.
Krigeage	Puntos Curvas	---	Método fiable	Muy difícil para arreglar los valores del variograma.
Auto-correlación	Fotografías Estereoscopia	---	Creación de MDT directamente a partir de imágenes. Precisión del MDT	Demasiado lento. Presencia de artefactos cuando las imágenes no corresponden perfectamente (fecha, hora de toma, etc.).
Dilatación	Puntos y/o Curvas "Raster"	++	No necesita herramientas de digitalización para extraer las curvas de nivel. Muy rápido.	Presencia de zonas planas cuando no hay muchos puntos de medida.

Wood (1996) propone utilizar varios indicadores que permiten medir la desviación entre un MDT de referencia y el modelo a estudiar; estos operadores son los siguientes:

Error medio cuadrático (*Root mean Square Error*) $RMSE = \sqrt{\frac{\sum (z_i - z_j)^2}{n}}$

Cociente de exactitud (*Accuracy ratio*) $a = \sqrt{\frac{\sum (z_i - z_j)^2}{\sum (z_i - \bar{z}_j)^2}}$

Sin embargo, estos indicadores necesitan un modelo de referencia. La similitud que existe entre los MDT raster y las imágenes permite usar tratamientos

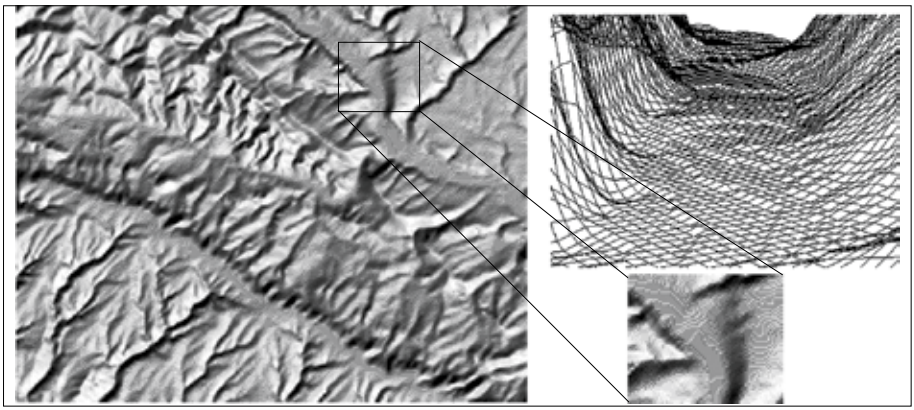


Figura 19. Ejemplo de *aliasing* en un MDT del *Pays de Bray*, Francia (en Baudemont, 1999).

clásicos de mejoramiento de dichas imágenes. Los filtros paso-alto (Pratt, 1978; González y Wood, 1992; Cocquerez y Philipp, 1995; Sonka *et al.*, 1999), como el filtro de Laplace, subrayan los efectos provenientes del *aliasing*. Se expresan de la manera siguiente:

$$P_{i,j} = \sum_{m=-M}^{N} \sum_{n=-N}^{M} h_{m,n} \cdot A_{i-m,\, j-n}$$

donde $M = N = 1$:

$$h = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad h = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \text{ o } h = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix}$$

Por otro lado, los datos iniciales pueden ser deficientes. Como lo muestra la Figura 20, una interpolación utilizando curvas de nivel con un intervalo altimétrico de 20 metros no elimina a veces el peso de los datos de origen.

La eliminación de los artefactos se debe efectuar directamente sobre el MDT. Wood (1996) propone aplicar los filtros paso bajo que suavizan la superficie (Pratt, 1978; González y Wood, 1992). Aunque produciendo un aspecto visual satisfactorio, dichos filtros no eliminan totalmente los artefactos y borran una parte de la información del MDT.

Sin embargo, la suavización mejora el aspecto de la superficie. Existen filtros que reducen el "ruido" (Cocquerez y Philipp, 1995). Los filtros siguientes son los

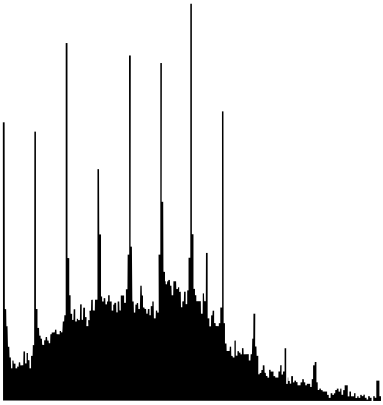


Figura 20. La influencia de la densidad de los datos de origen aparece en el histograma del MDT sombreado donde resaltan las zonas planas.

más utilizados y por medio de máscaras de convolución, son de uso fácil. Para un píxel dado $A_{i,j}$:

$$P_{i,j} = \sum_{m=-M}^{N} \sum_{n=-N}^{M} h_{m,n} \cdot A_{i-m,\, j-n}$$

donde $M=N=1$:

$$h = \frac{1}{9}\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad h = \frac{1}{10}\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \text{ o } h = \frac{1}{16}\begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix} \text{ (Pratt, 1978)}$$

También se puede utilizar el filtro gaussiano o el filtro exponencial, que corresponden respectivamente a:

$$h_{x,y} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

y

$$h_{x,y} = \frac{\beta^2}{16} e^{-\beta(|x|+|y|)}$$

Máscaras 3 × 3 y 5 × 5 parecen conservar los detalles y eliminar los artefactos. Sin embargo, el remuestreo (interpolación spline de diez grados) da mejores resultados. De hecho, las funciones de remuestreo como la función bi-cúbica, la función spline o las interpolaciones bi-lineales, controlan mejor el aspecto de la superficie, eliminan todos los artefactos y borran menos los detalles.

Las funciones de remuestreo son las siguientes:

a) **interpolación al vecino más próximo**: esta función crea demasiados efectos de *aliasing*. Consiste en dar a un punto el valor del vecino más próximo.

b) **interpolación bi-lineal**: esta interpolación tiene la ventaja de asegurar la continuidad de la superficie interpolada y así eliminar el *aliasing*, pero el aspecto final es anguloso porque su derivada no es continua. Esta interpolación resulta de la convolución entre la señal discreta y una función triángulo (producto de una convolución entre dos funciones rectangulares):

$$F(x, y) = f(x,y) \cdot Rect^2$$

o al nivel analítico:

$$Z\,x, y = \begin{bmatrix} 1-x & x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{0,0} & Z_{0,1} \\ Z_{1,0} & Z_{1,1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1-y \\ y \end{bmatrix}$$

c) **interpolación bi-cúbica o de grado superior**: esta interpolación corresponde a una generalización de las fórmulas anteriores. Es el producto de una convolución entre la señal discreta y la función rectángulo elevada a la potencia *n*:

$$F(x, y) = f(x,y) \cdot Rect^n$$

El modelo de la superficie se obtiene fácilmente:

$$Z_n(u, v) = \sum_{j=0}^{n} \sum_{i=0}^{n} C_n^i \cdot u^i \cdot (1-u)^{n-i} \cdot C_n^j \cdot v^j \cdot (1-u)^{n-i} \cdot P_{i,j}$$

con

$n \geq 1$ orden de interpolación y

$P_{i,j}$ $0 \leq i \leq n \leq$ *et* $0 \leq j \leq n \leq$ puntos de control de la superficie.

A partir de esta base se pueden definir otros interpoladores, tales como los B-Splines y los β-Splines que se escriben de la misma manera que la superficie de Bézier (Schweizer, 1987). La ventaja de una interpolación con una superficie spline reside en el hecho de que se obtiene una superficie cuyas derivadas de primer y segundo orden son continuas (Figura 21). Esta característica es importante sobre todo cuando se trata de obtener atributos confiables a partir de la superficie del MDT estudiado.

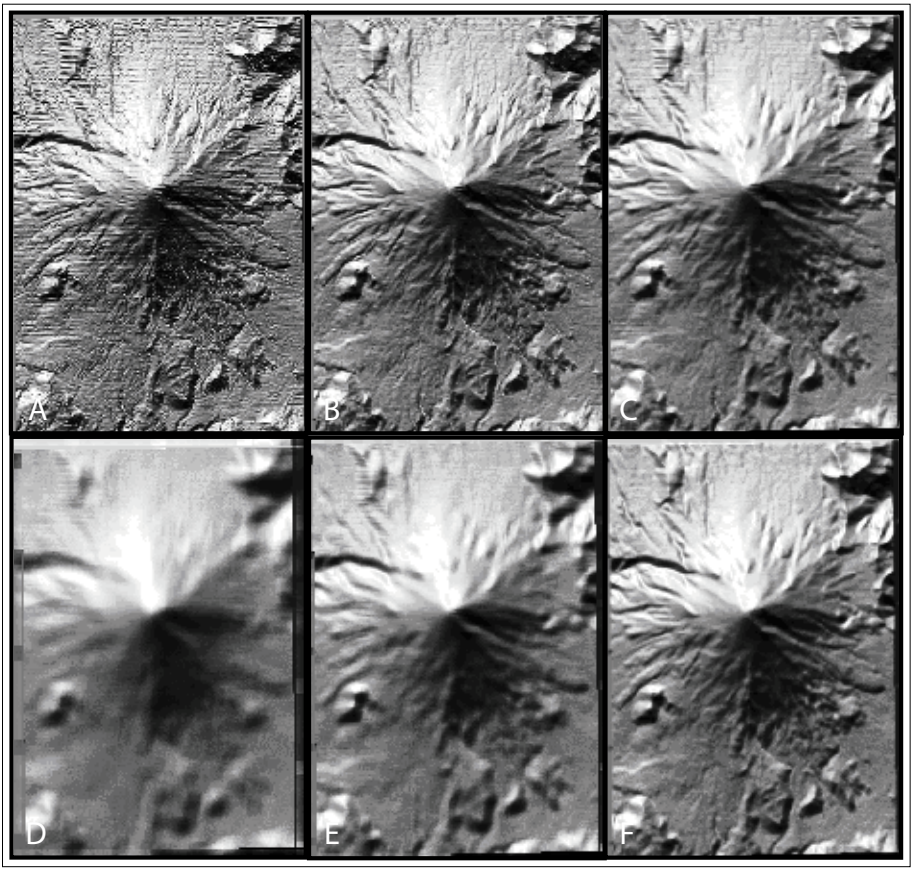


Figura 21. MDT del Monte St. Helens, Estados Unidos. A - MDT original. B - Suavización 3x3. C - 5x5. D - 9x9. E - 17x17. F - Remuestreo 10 (en Baudemont, 1999).

Referencias

Baudemont, F. (1999), "Analyse numérique des formes de relief sur les modèles numériques de terrain", *Thèse Universite Paris*, VI.

Berg, M. and Dobrindt, K. T. G. (1998), "On levels of detail in terrains", *Graphical Models and Image Processing*, 60(1), pp. 1-12.

Burrough, P. A., W. van Deursen and G. Heuvelink (1988), "Linking spatial process models and GIS: a marriage of convenience or a blossoming partnership?", *GIS/LIS'88 Proceedings*: 598-607. San Antonio, Texas.

Braile, L. (1978), "Comparison of four random to grid methods", C*omputer and Geosciences*, no. 4, pp. 341-349.

Cocquerez, J.-P. and S. Philipp (1995), *Analyse d'images: filtrage et segmentation*, Ed. Masson.

Delaunay, B. N. (1934), "Sur la sphère vide", *Bulletin de l'Académie des sciences URSS class Sci. Math.*, pp. 793-800.

De Masson d'Autume, G. (1978), "Construction du modèle numérique d'une surface par approximations successives. Application aux modèles numériques de Terrain (MNT)", *Bulletin de la Société Française de Photogrammetrie et de Télédétection*, no. 71-72.

Doyle, F. J. (1978), "Digital terrain models : an overview", *Photogrammetric Enginnering and Remote Sensing*, 44(12), pp. 1481-1485.

Dubrule, 0. (1984), "Comparing splines and kriging", *Computer and Geosciences*, no. 10, pp. 327-338.

Duchon, J. (1975), "Fonction spline assiciée à n observations d'une fonction aléatoire", *Compte Rendu Acad. Sci.*, Paris, T. 1, no. 14.

Duchon, J. (1976), "Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces", *RAIRO Analyse Numérique*, no. 10, pp. 5-12.

González R. C. and R. C. Woods (1992), *Digitial Image Processing, Reading*, Ed. Addison-Wesley.

Guichard H., G. Ruckebusch, E. Sueur and S. Wormser (1988), "Stéréorestitution numérique SPOT: une approche originale de formation des images épipolaires et de mise en correspondante", in *SPOT1. Utilisation des images bilan et résultats*, Cepadues edit.

Hannah, M. J. (1981), "Error detection and correction in digital terrain models", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(1), pp. 63-69.

Hottier P. and M. Albattah (1993), "Transformation d'un couple de scènes SPOT en un couple d'images épipolaires analogiquement ou analytiquement restituable sans déformation de relief", *Bull. Soc. Fr. Photogrammétrie et Télédétection*, no. 123.

Julien, P. (1988), "Exploitation des images SPOT, par corrélation automatique, pour la réalisation d'un MNT", *Document interne IGN*.

Julien, P. (1994), "Traitements altimétriques (Modèles Numériques de Terrain)", *Support de cours de DEA SIG, ENSG-IGN.*

Lee, J., P. K. Snyder and P. F. Fisher (1992), "Modelling the effect of data errors on feature extraction from digital elevation models", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58(10), pp. 1461-1467.

Matheron, G. (1969), "Le krigeage universel", Cahiers de Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, fasc. 1.

Matheron, G. (1981), "Splines and kriging: their formal equivalence. Down to Earth Statistics: solutions looking for geological problems. Syracuse University", *Geology contribution*, no. 8, pp. 77-95.

Miller, C. L. and R. A. Laflamme (1958), "The digital terrain model – Theory and Application", *Photogrammetric Engineering*, no. 24, pp. 433-442.

Mitas, L. and H. Mitasova (1988), "General variational approach to the interpolation problem", *Computers and Mathematics with Applications*, no. 16, pp. 983-992.

Mitasova, H. and J. Hofierka (1993), "Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis", *Mathematical Geology*, no. l25, pp. 657-669.

Mitasova, H. and L. Mitas (1993), "Interpolation by regularized spline with tension: I theory and implementation", *Mathematical Geology*, no. 25, pp. 641-655.

Oliver, M. A. and R. Webster (1990), "Kriging: a method of interpolation for geographical information systems", *International Journal of Geographic Information Systems*, 4(3), pp. 313-332.

Oswald, H. and H. Raestzsch (1984), "System for generation and display of digital elevation models", *Geo. Processing*, 2(2), pp. 197-218.

Parrot, J.-F. (2003), *Programs Miel4_mx and Miel_mx_v2* (software inédito).

Parrot, J.-F. y V. Ochoa-Tejeda (2005), *Generación de Modelos Digitales de Terreno. Método de digitalización*, Geografía para el Siglo XXI, Instituto de Geografía, UNAM (disponible en versión electrónica).

Peet, F. G. and T. S. Sahota (1985), "Surface curvature as a measure of image texture", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(6), pp. 734-738.

Peucker, T. K., R. J. Fowler, J. J. Little and D. M. Mark (1978), "The triangulated irregular network", *Proceedings of the ASP Digital Terrain Models (DTM) Symposium*, American Society of Photogrammetry. Falls Church, Virginia, pp. 516-540.

Peuker, T. and D. H. Douglas (1975), "Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain-elevation data", *Computer Graphics and Image Processing*, 4(4), pp. 375-387.

Pratt, W. K. (1978), *Digital image processing*, Ed Wiley, New York.

Raper, J. F. (1989), "The 3-dimensional geoscientific mapping and modelling system: a conceptual design, in "Three-Dimensional applications in Geographic Information Systems", *Taylor and Francis*, Ed. J. Raper, London, pp. 11-20.

Schweizer, P. (1987), *Infographie*, vol. 1 and I, Ed Presses Polytechniques romandes.

Sonka, M., V. Hlavac and R. Boyle (1999), *Image processing analysis and machine vision*, International Thomson Publishing.

Taud, H., J.-F. Parrot and R. Álvarez (1999), "DTM generation by contour line dilation", *Computer and Geosciences*, no. 25, pp. 775-783.

Tsai, V. (1993), "Fast topological construction of Delaunay triangulation and Voronoï diagrams", *Computer and Geosciences*, 19(10), pp. 1463-1474.

Van Driel, J. N. (1989), "Three dimensional display of geologic data", in *Three-Dimensional applications in Geographic Information Systems*, Ed J. Raper, Taylor & Francis, London, pp. 1-10.

Voronoï, M. G. (1908), "Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques", *Journal Reine Angew. Math.*, no. 134, pp. 198-287.

Watson, D. F. (1981), "Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoï polytopes", *The Computer Journal*, 24(2), pp. 167-172.

Wood, J. (1996), *The geomorphological characterisation of Digital Elevation Model*, Master of Sciences, Leicester University (UK).

Wood, J. and P. F. Fisher (1993), "Assessing interpolation accuracy in elevation models", *IEEE Computer Graphics and Applications*, 12(2), pp. 48-56.

Capítulo 3. Los sistemas de posicionamiento global (GPS) y su aplicación en Geomática

Jorge Prado Molina
Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE)
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Los sistemas de posicionamiento global (GPS) permiten determinar la posición geográfica y proporcionan una ayuda muy importante, en tiempo real, para efectuar la navegación. Su operación está basada en la interpretación de señales emitidas por un grupo de satélites, y captadas por receptores en cualquier lugar del planeta, ya sea en el mar, el espacio aéreo o en tierra (gpsinformation, 2006a). Hoy en día muchas actividades importantes dependen totalmente de la confiabilidad de la información que este sistema de posicionamiento proporciona; incluyendo también una base de tiempo precisa, no obstante, esto no siempre ha sido así.

Desde los inicios de la humanidad, el hombre ha tenido la necesidad de trasladarse de un lugar a otro, ya sea en busca de mejores sitios de caza, condiciones de vida o simplemente por explorar el territorio a su alrededor. El hecho de tener que recordar algunos detalles sobre el terreno, que sirvieran como marcas distintivas para completar de manera exitosa el viaje, ayudó a crear un método de navegación rudimentario. El proceso de determinar la posición con respecto a una referencia y establecer el rumbo que debe seguirse para llegar a un destino, siempre ha sido muy difícil de llevar a cabo; y ha implicado retos mayúsculos especialmente cuando se abarcan porciones grandes del planeta o se emprende una exploración transoceánica. El descubrir un nuevo territorio es solamente la primera parte de la tarea, es necesario también saber cómo regresar al lugar de donde se partió (Historia de la navegación, 2006).

Durante muchos años la posición de las estrellas fue cuidadosamente observada y compilada en almanaques que los viajeros llevaban consigo. Estas tablas, junto con la observación del ángulo entre una estrella y el horizonte terrestre,

servían para determinar la latitud en que se encontraban. Sin embargo, no sabían a qué distancia se hallaban desde el punto de partida. Durante el renacimiento, con las exploraciones allende los océanos, la navegación y la cartografía tomaron un auge inusitado. Estos avances contribuyeron a crear imperios, y a que hazañas como el descubrimiento de América y el viaje de circunnavegación de Fernando de Magallanes, fueran completadas con éxito.

No obstante estos avances, todavía tendrían que pasar algunos siglos para que la posición sobre la Tierra fuera determinada por completo. El desconocimiento de la longitud causaba que muchas embarcaciones junto con su preciosa carga zozobraran en aguas desconocidas (*Ibid.*). Durante los siglos XVII y XVIII se realizaron importantes esfuerzos para determinar la longitud. Con la Tierra dividida en meridianos y paralelos y con el establecimiento del Observatorio de Greenwich en 1675, el elemento faltante era la medición precisa del tiempo. Los relojeros se dieron a la tarea de construir un reloj preciso, mientras que los astrónomos desarrollaban un método llamado de las "distancias lunares"; éste predecía las posiciones angulares entre diferentes astros como la Luna, el Sol, los planetas y algunas estrellas. Usando esta técnica, el navegador marítimo podía medir el ángulo entre la Luna y algún otro cuerpo celeste, calcular el tiempo en el que éstos deberían estar precisamente en esa posición angular y entonces comparar el cronómetro de la embarcación, con el tiempo actual en el Observatorio de Greenwich. Determinado el tiempo de manera correcta, en la posición actual, el navegante puede ahora establecer a qué distancia se encuentra desde su punto de partida, sabiendo que 15 grados de longitud son equivalentes a una hora y calculando también las fracciones correspondientes de minutos y segundos. Este método fue usado hasta principios del siglo XX, cuando fue reemplazado por el radiotelégrafo que enviaba la hora exacta a la nave.

Navegación

Uno de los métodos de navegación más utilizados durante los últimos siglos, es aquél que determina la posición de la nave mediante la estimación de la posición (*dead reckoning*). Este proceso estima la localización global de un vehículo, usando la posición inicial, el rumbo, la velocidad y el tiempo de recorrido; sin considerar la posición de las estrellas, el Sol, la Luna o los planetas. Permite, además, estimar la localización momentánea del vehículo o saber en donde se encontrará si se mantiene la velocidad, el tiempo y el curso que se tiene planeado seguir. Este método de navegación es utilizado en barcos, aeronaves, automóviles, trenes

y equipos de construcción de túneles. En el caso de la navegación marítima, la posición se dibuja sobre un mapa o carta de navegación, en cualquier momento a partir de la distancia recorrida. La distancia se determina con el tiempo y la velocidad (velocidad x tiempo = distancia). La velocidad se determina a través de las rpm del motor a con algún otro método y las gráficas de posición se hacen en tiempos fijos para establecer una cierta periodicidad en la medición. Eso establece una tendencia que permite hacer predicciones sobre la parte faltante del recorrido. Para tener una estimación de la posición más acertada, es necesario considerar los vientos, las corrientes y las mareas. Estas fuerzas externas que actúan sobre el barco, causan una desviación de su curso. El navegante debe mantener un curso tal que compense las fuerzas externas para poder llegar a su destino final. En el caso de la navegación aérea, hay que compensar las fuerzas producidas por el viento y en viajes muy largos, particularmente de Norte a Sur o viceversa, el efecto de la rotación de la Tierra.

Navegación Inercial

Los conceptos básicos de la navegación inercial serán tratados aquí de una manera muy simplificada. Un caso simple de navegación en una dimensión involucra la determinación de la posición de un tren, el cual se mueve a lo largo de una vía recta, en un plano (Titterton y Weston, 1997). Es posible calcular la velocidad instantánea del tren y la distancia que éste ha recorrido desde el punto de partida, por medio de mediciones de su aceleración a lo largo de la vía. Si un acelerómetro se encuentra fijo al tren, este dispositivo proporcionará la información concerniente a su aceleración. La integral en el tiempo de las mediciones de la aceleración proporciona una estimación continua de la velocidad instantánea del tren, suponiendo que se conoce su velocidad inicial. Una segunda integración da la distancia que ha viajado, con respecto al punto de inicio conocido. El acelerómetro junto con una computadora, u otro dispositivo capaz de realizar la integración, constituyen un sistema simple de navegación en una dimensión.

El caso más general de movimiento sobre un plano, ilustrado en la Figura 1 se presenta cuando la vía es curva, en este caso es necesario detectar continuamente el movimiento de translación en dos direcciones y los cambios en su dirección de viaje, es decir, detectar la rotación del tren alrededor de la perpendicular al plano de movimiento, conforme el tren se mueve a lo largo de la vía.

Dos acelerómetros son ahora necesarios para detectar el movimiento traslacional en direcciones que van a lo largo y de manera perpendicular a la vía. Pero

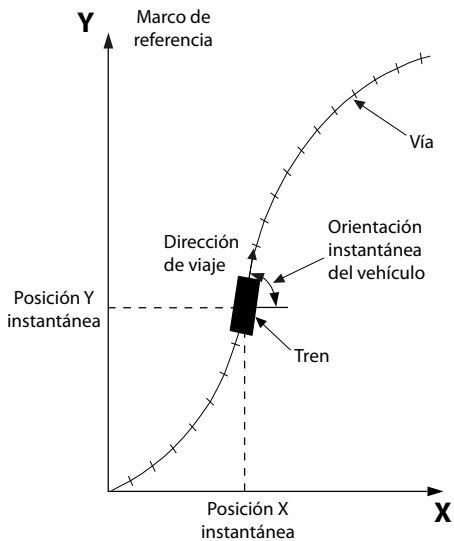


Figura 1. Navegación en dos dimensiones (fuente: Ruiz, 2006).

además necesitamos conocer la dirección del movimiento; un sensor muy adecuado para medir el movimiento rotacional es un giróscopo que, esencialmente, es un sensor de velocidad angular. Entonces, es posible construir un sistema sencillo de navegación bidimensional usando un giróscopo, dos acelerómetros y una computadora. Las mediciones serán procesadas para proporcionar estimaciones continuas de la posición, velocidad y la orientación del tren.

En general, se necesita determinar la posición del vehículo con respecto a un marco de referencia tridimensional, consecuentemente se necesitarán tres giróscopos para proporcionar la medición de variación angular del vehículo alrededor de tres ejes distintos, al mismo tiempo que tres acelerómetros proporcionan las componentes de aceleración que el vehículo experimenta a lo largo de estos mismos ejes. Por conveniencia y precisión, los tres ejes usualmente son mutuamente perpendiculares (Figura 2).

Un sistema de navegación inercial tiene la capacidad de determinar la orientación del vehículo y de proporcionar su posición geográfica. Esto permite guiar a cualquier tipo de vehículo, lento o rápido, bajo el agua, dentro o fuera de la atmósfera, independientemente del contacto con cualquier medio, o la presencia o ausencia de radiación o campos magnéticos. Esto significa que los problemas fundamentales de determinar nuestra posición y saber hacia donde nos dirigimos, quedan resueltos con el empleo de los sistemas de navegación inercial, o al menos eso parece en un principio.

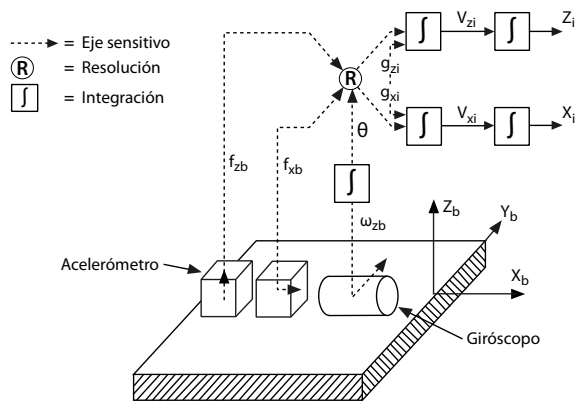


Figura 2. Diagrama de bloques de un sistema de navegación inercial en dos dimensiones (fuente: Titterton y Weston, 1997).

Sistemas de Navegación Asistidos

No obstante que los sistemas de navegación inercial proporcionan información precisa de la orientación y la distancia recorrida, los giróscopos van acumulando errores en sus mediciones conforme pasa el tiempo, por lo que se incurre en imprecisiones en la navegación. Cualquier navegador inercial sufre el problema de la deriva, no importa lo costoso o sofisticado que éste sea (Merhav, 1993). La forma más básica de un giróscopo hace uso de las propiedades inerciales de una rueda o rotor girando a grandes velocidades. Esta rueda giratoria tiende a mantener la dirección de su eje de giro en el espacio, para de esta manera definir una dirección de referencia. La Figura 3 muestra la idea básica de un giróscopo, el cual consta de un rotor suspendido sobre una montura con dos anillos basculantes.

Una vez que el rotor se pone en marcha con el eje de giro en una dirección arbitraria, éste permanecerá en esa dirección inicial, hasta que algún par externo sea aplicado de manera perpendicular al eje de giro. Este par provocará que el rotor gire en cuadratura alrededor de un tercer eje, es decir, el rotor precesará. Este dato es usado para cuantificar la velocidad angular de uno de los ejes de la nave, sin embargo, existen varios factores que afectan el funcionamiento del giróscopo de masa giratoria. En condiciones reales, existe fricción en el rotor y los rodamientos de los anillos, desbalanceo en el rotor y los anillos, el transductor presenta fricción y además todas estas características cambian con el tiempo, la temperatura y otros factores ambientales. Todo esto produce una precesión adicional en el eje de giro, del orden de alguna fracción de grado sobre minuto. Esta precesión es conocida como deriva; y es la falla principal que presentan los giróscopos en menor o mayor grado dependiendo de la calidad y la tecnología

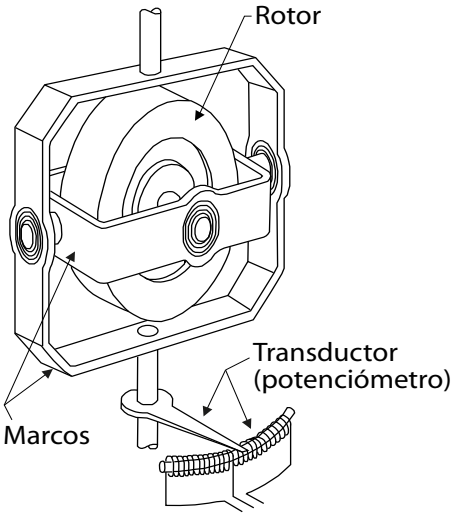


Figura 3. Partes principales de un giróscopo (fuente: Ruiz, 2006).

empleadas en su construcción, y debe ser corregida con algún método (Becerril y Rodríguez, 2000).

Radiofaros

Para contrarrestar el efecto de la deriva, los sistemas de navegación pueden ser asistidos desde el exterior para obtener una actualización de su posición. Para este propósito existen varios sistemas de radio navegación que proveen información sobre la ubicación de la nave (Lawrence, 1998). Las ondas de radio constituyen una fuente especialmente fructífera de ayuda para la navegación, originalmente, sólo servían como un medio para proveer señales de tiempo para la corrección del cronómetro de las naves durante la navegación guiada por estrellas. Más adelante fueron utilizadas para proporcionar información de la dirección (con la ayuda de antenas direccionales) e información de distancias a través de la medición de la duración del viaje de las ondas.

Las ondas de radio también han servido para determinar la posición de un vehículo en tierra, utilizando el efecto Doppler (el cambio aparente en frecuencia de una señal que es percibido por un observador que tiene un movimiento con respecto a la fuente de la señal).

El sistema de navegación satelital TRANSIT, creado por la marina estadounidense, utilizaba esta técnica para enviar señales continuas que incluían el tiempo

exacto y los parámetros orbitales de cada satélite. Dichos parámetros eran enviados desde el centro de control en el Observatorio Naval y retransmitidos por los satélites hacia los receptores, con lo que era posible determinar la posición de manera global. El sistema TRANSIT se creó con la finalidad de que los submarinos nucleares pudieran obtener una posición de referencia para sus sistemas de navegación inercial, ya que después de varios días de navegación, éstos sufrían el problema de la deriva. Sin embargo, un inconveniente muy grande del sistema TRANSIT es que no poseía una cobertura global, por la cantidad de satélites y la altura de sus órbitas, esto hacía que las posiciones en latitudes medias se pudieran determinar cada hora o cada dos horas, como máximo. Con algunas mejoras, el sistema pudo entregar una precisión de 200 m y una sincronización de 50 microsegundos, hasta que en 1996 fue sustituido por el sistema de posicionamiento global GPS (Global Positioning System) NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing and Ranging).

GPS es la aplicación más reciente de los métodos de localización y ayuda a la navegación.

Como ejemplo de sistemas de radionavegación tenemos el Loran-C y el Omega, que tienen una precisión entre 500 y 4 500 m y no proporcionan información sobre la velocidad. Los sistemas de ayuda a la navegación como el NAVSTAR o GLONASS (Global Navigation Satellite System) basados en constelaciones de satélites, tienen una precisión nominal en la posición de 15 m, proporcionan la velocidad con que se mueve la nave, una base de tiempo y muchos otros datos. Esto los convierte en sistemas imprescindibles para la navegación, la geodesia y en otras muchas aplicaciones, como más adelante se verá.

Los sistemas de navegación inercial van acumulando errores en la posición. El GPS varía su precisión en un intervalo de unos pocos metros a lo largo del tiempo, y esta es una de sus mayores virtudes, pero no puede decir si alguno de los ejes de la nave está experimentando una rotación; de esta manera, ambos equipos se complementan. Los métodos de recepción de señales radiodifundidas están sujetos a errores o inoperatividad; debido a causas naturales o inducidas. Existen varias razones prácticas para que la guía inercial haya sido desarrollada con tanto denuedo. La característica de autosuficiencia, por ejemplo, resultó crucial para propósitos militares durante varias décadas, aunque esto ha cambiado en los últimos años de manera sustancial, por razones principalmente económicas; mientras un sistema inercial de largo alcance cuesta del orden de millones de dólares, un receptor GPS militar puede costar algunas decenas de miles de dólares.

Como se ha visto, históricamente la navegación no ha resultado ser una tarea sencilla, las marcas en el terreno usadas como referencia son útiles en un entorno muy reducido o simplemente son inexistentes en lugares como bosques

y selvas cerradas, desiertos, tundra u océanos. El método de navegación estelar sólo funciona de noche y cuando hay buenas condiciones de tiempo, al igual que el método de la distancia lunar que sólo funciona con cielo despejado. El método de navegación que estima la posición de la nave a partir de la velocidad y la dirección en que se viaja, pronto cae en la acumulación de errores. Los sistemas de navegación inercial presentan el problema de la deriva, y los radiofaros de ayuda a la navegación sufren de interferencia y tienen un alcance limitado.

Con la puesta en órbita de los sistemas globales de navegación satelital (GNSS pos sus siglas en inglés), las tareas de determinación de la posición, la navegación y la obtención de la hora exacta, pasaron a simplificarse enormemente, como se verá en la siguiente sección.

Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)

La elaboración de mapas detallados de la superficie terrestre ha sido siempre una tarea indispensable para el hombre, desde que comenzó la exploración del planeta. En los inicios de la historia, en las culturas China y Egipcia esta actividad se reducía a elaborar simples croquis que únicamente podían dar rumbo y posición poco confiables. Los primeros mapas pueden atribuirse a las culturas Hitita, Egipcia y Mesopotámica: el de Catal-Hyûk, Turkía, el de Wadi Hammamat, Egipto (o mapa de Turín) y la tablilla en relieve de Ga-sur, Irak; de los siglos VII, III y II a.C., respectivamente (Davies, 2006; http://www.henry-davis.com/MAPS/Ancient%20Web%20Pages/AncientL.html y http://en.wikipedia.org/wiki/Turin_Papyrus_Map). Fueron los egipcios quienes establecieron la cartografía como ciencia, mientras que fenicios y helénicos le dieron auge y los árabes la conservaron. Sin embargo, fue el desarrollo de los avances científicos y conceptuales (geodesia, astronomía, cartografía, matemáticas, etc.), las técnicas de navegación marítima, aérea y espacial, así como la irrupción de los sensores de estado sólido y el control computarizado, lo que nos ha llevado a los avances que hoy conocemos, teniendo en la cumbre de este desarrollo a los GNSS (Global Navigation Satellite Systems), (Venegas, 2005).

Los GNSS proporcionan las coordenadas tridimensionales en tiempo real de un móvil, lo que es básico para la navegación, pero también permiten determinar posiciones exactas, como algunas configuraciones de GPS que pueden efectuar mediciones con menos de un centímetro de error. El sistema GPS fue creado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos para cubrir las limitaciones de la constelación de satélites TRANSIT que en la década de los años setenta del

siglo XX, proporcionaba posicionamiento global, y cuyas desventajas se han mencionado. No obstante, dicha constelación sirvió para establecer las bases de los sistemas de posicionamiento global actuales, como el NAVSTAR estadounidense, el GLONASS ruso, el GALILEO de la Unión Europea y el COMPASS de la República Popular China, que entrará en funciones en el 2013 y 2015, respectivamente. En este capítulo sólo se discutirán los aspectos fundamentales de funcionamiento del sistema NAVSTAR.

En 1978 se lanzaron los cuatro primeros satélites de la constelación NAVSTAR, lo que permitió dar inicio a sus operaciones de manera formal. Éste consta básicamente de tres sectores: el espacial, el del usuario y el de control (Ruiz, 2006).

Sector del espacio

Está formado por una constelación de 24 satélites, 21 de ellos en operación y tres en reserva, colocados en órbitas circulares aproximadamente a 20 200 [km] sobre la Tierra. Se encuentran ordenados en seis planos orbitales, todo esto está calculado para cubrir la mayor parte del planeta y asegurar que en cualquier punto de la Tierra y a cualquier hora se tengan disponibles al menos cuatro satélites. No obstante que sólo se necesitan tres de ellos para resolver el posicionamiento, el tener cuatro como mínimo es fundamental para aumentar la precisión del sistema. Los satélites cuentan con antenas de tipo helicoidal con 700 watts de potencia para transmitir sus señales y cuentan con relojes atómicos muy precisos (Venegas, 2005).

Sector del usuario

Está compuesto por todos los receptores o instrumentos que se emplean para el cálculo, mediante el uso de las señales satelitales, de las coordenadas de un punto, la velocidad, una referencia de tiempo, etc. El equipo básico del usuario está formado por un receptor y una antena. Existen diversas formas de analizar, sincronizar e interpretar las señales provenientes de los satélites GPS, por eso la diferencia de precisión que manejan los distintos equipos. Los actuales receptores GPS están compuestos por unos cuantos circuitos integrados, por lo que se han vuelto muy económicos y accesibles a prácticamente cualquier usuario (Ruiz, 2006). Algunos receptores GPS tienen un almanaque almacenado en su memoria interna que les dice qué satélites se encuentran en el cielo, momento a momento, esto permite que el tiempo de adquisición de la posición se reduzca de 45 a 15 segundos (http://www.trimble.com/gps/index.shtml).

Sector de control

Hay cinco estaciones de seguimiento para la constelación NAVSTAR: la estación central o maestra (*Consolidated Satellite Operation Center*-CSOC o Master Control Center) que se encuentra en Colorado Springs, exactamente en la base Falcon de la fuerza aérea de Estados Unidos. Las otras cuatro estaciones son de monitoreo y están situadas en: la isla de Ascensión (Atlántico Sur), la isla de Diego García (Océano Índico), en el atolón de Kwajalein (Pacífico Occidental), en las islas Hawaii (Pacífico Oriental). Además hay otra estación central de reserva en Sunnivale (California), concretamente en la Base Ozinuka de la fuerza aérea estadounidense.

Las estaciones están regularmente espaciadas en longitud, localizadas con coordenadas muy precisas. Reciben continuamente las señales de los satélites, obteniendo la información necesaria para establecer la órbita de los mismos con alta precisión. Los datos obtenidos por las estaciones se envían al centro de control maestro, donde son procesados para calcular los errores en las efemérides y los estados de los relojes. Esta información se transmite hacia los satélites y éstos a su vez harán los ajustes correspondientes y retransmitirán a la Tierra las nuevas señales ya corregidas. Los cambios producidos en algunos de los parámetros orbitales, son causados por los efectos gravitacionales de la Luna, el Sol y por la presión causada por el viento solar sobre los satélites. Los errores son muy pequeños, pero si se busca una alta precisión, entonces éstos deben tomarse en cuenta (Trimble, 2006).

Posicionamiento mediante triangulación

El concepto básico detrás de los GPS es conocer la posición exacta de los satélites, y usarla como referencia para localizar puntos en la Tierra, midiendo de manera precisa las distancias a por lo menos tres de ellos, para triangular la posición que nos interesa (Figura 4).

Supóngase que la primera distancia que se obtiene hacia un satélite resulta ser de 25 000 [km], esto quiere decir que la posición se ubica en algún lugar dentro de una esfera centrada en dicho satélite y que tiene un radio de 25 000 [km]. Enseguida se mide la distancia hasta otro satélite y se tiene que es de 24 000 [km], esto indica que además de estar localizados en la superficie de la primera esfera de radio 25 000 [km], se está también dentro de la superficie de otra esfera de 24 000 [km] de radio centrada en el segundo satélite, es decir, se está en algún lugar en la semi-circunferencia resultante de la intersección de dichas esferas. Ahora, si se mide la distancia hasta un tercer satélite y ésta es de 23 000 [km],

Figura 4. Trilateración, determinación de la posición a partir de la intersección de tres esferas (fuente: LAGE, Instituto de Geografía, UNAM).

entonces la posible ubicación se reduce a sólo dos puntos resultado de la intersección de la esfera de radio 23 000 [km] centrada en el tercer satélite y el semicírculo que es la intersección de las primeras dos esferas. De esta manera, con tres satélites, se reduce la localización a sólo dos puntos en el espacio, normalmente uno de ellos estará fuera de la Tierra y puede ser eliminado sin problemas, o se puede obtener otra medición y eliminar la ambigüedad. A este proceso se le llama triangulación satelital, o de manera correcta, trilateración.

Una vez hecha la trilateración, se sabe a qué distancia está el receptor de los satélites, pero aún es necesario que la distancia calculada esté relacionada con un marco de referencia terrestre. Para este propósito se emplean las órbitas de los satélites, aquí es donde toma sentido el hecho de tenerlas localizadas con alta precisión. Al conocer la ubicación precisa de cada satélite GPS con respecto a la Tierra, de la misma forma se resuelve la posición del punto de interés.

Señales enviadas por los satélites de la constelación NAVSTAR

Portadoras

Los satélites de la constelación envían sus señales sobre dos frecuencias portadoras: la L1 a 1 575.42 MHz que lleva un mensaje sobre el estatus del satélite y un código pseudo-aleatorio para sincronización.

La portadora L2 que trabaja a 1 227.60 MHz y que también es usada para transmitir un código militar pseudo-aleatorio más preciso.

Códigos Pseudo-aleatorios

Cada satélite tiene un código pseudo-aleatorio propio para evitar confusiones e interferencias entre ellos. Existen dos tipos de códigos pseudo-aleatorios: el primero es llamado C/A (*Coarse acquisition*) adquisición burda o S (*Standard*) que se utiliza en el sistema de posicionamiento estándar SPS (*Standard Positioning System*) y que modula la portadora L1. El segundo código es llamado P (*precise*) preciso que se repite en ciclos de siete días y modula ambas portadoras L1 y L2 a una frecuencia de 10 MHz. Este código está destinado a los usuarios militares y puede estar encriptado, cuando lo está, es llamado código "Y" y solamente los receptores militares con la clave de de-encriptación pueden recibirlo e interpretarlo. Debido a que está modulado sobre dos portadoras, esto permite hacer mediciones para eliminar errores de las señales cuando éstas atraviesan la atmósfera, como se verá más adelante.

Otra de las grandes ventajas del código pseudo-aleatorio es que utilizando técnicas especiales de la teoría de la información, es posible amplificar la señal GPS. Esto evita la necesidad de antenas parabólicas de gran tamaño para recibir las señales desde los satélites. Esto no se puede aplicar en la recepción de señales de TV, por la diferencia tan grande en la cantidad de información que maneja esta última.

Los diferentes códigos y frecuencias portadoras son utilizados por diferentes receptores, éstos pueden ser clasificados de acuerdo con estas características:

Tabla 1. Códigos transmitidos por el sistema GPS_NAVSTAR y algunos de sus usos

CÓDIGO	USOS
C/A o S	Posicionamiento burdo.
C/A + fase portadora L1	Geodésico, navegación.
C/A + fase portadora L1 + fase portadora L2	Geodésico de alta precisión, navegación de precisión, RTK (Real Time Kinematics o Cinemático en Tiempo Real).
C/A + código P + fases portadoras L1, L2	Militar.

Fuente: Ruiz, 2006.

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de una señal pseudo-aleatoria, su patrón complejo asegura que el receptor no se sincronice accidentalmente con una señal ajena al sistema GPS. Este código pseudoaleatorio es fundamental para la sincronización del reloj del receptor y por ende, para la medición de las distancias.

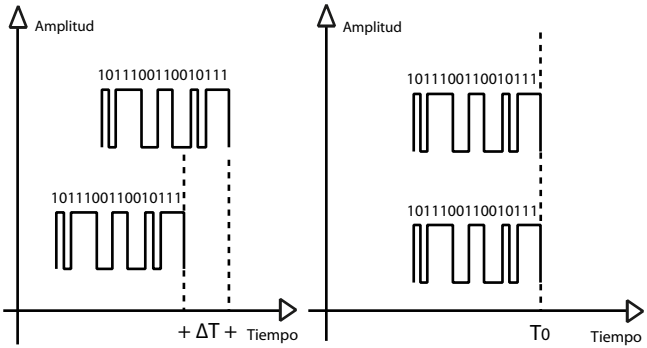


Figura 5. Señales pseudo-aleatorias. A) con la misma frecuencia pero fuera de fase y B) señales en fase (fuente: LAGE, Instituto de Geografía, UNAM).

¿Cómo se efectúa la medición de las distancias entre el receptor y los satélites?
Esta medición de distancia está basada en el tiempo que tarda en viajar la señal electromagnética desde el satélite hacia nuestra posición en el planeta. Si se toma en cuenta que las señales viajan aproximadamente a 300 000 km/s, esto significa que un error en la medición de una milésima de segundo implica un error de 300 km (recordar que la distancia se obtiene con la fórmula: d = velocidad x tiempo). Esto nos da una idea del extremo cuidado que se debe tener con las bases de tiempo que se manejan. En otras palabras, hay que medir con mucho cuidado el tiempo de retraso que existe entre el momento en que la señal abandonó el satélite y el instante en que llegó al receptor. Por tanto, el reloj del satélite, como el del receptor, tiene que estar perfectamente sincronizado (Tiempo Universal Coordinado). Los satélites tienen relojes atómicos extremadamente precisos, pero los receptores no, así que se debe encontrar una manera de lograr la sincronización de ambos relojes sin tener que gastar mucho dinero en un reloj atómico para el receptor, ya que esto lo haría impráctico. Para lograr esta sincronización se ha utilizado un método muy ingenioso.

Como el receptor sabe, por el almanaque guardado en su memoria interna, que el satélite debe estar en ese momento sobre el cielo, entonces hace oscilar la señal pseudo-aleatoria correspondiente a ese satélite. Recibe la señal y como ambas están oscilando a la misma frecuencia, entonces comienza a generar retrasos hasta que ambas señales se encuentran en fase, de esta manera determina el pequeño tiempo de retraso que existe entre ellas, lo multiplica por la velocidad de la luz y determina una distancia. De la misma manera se procede hasta obtener tres distancias y se completa la trilateración.

Pero más aún, si existe una forma de determinar la posición a partir de tres distancias medidas con alta precisión, el mismo objetivo puede lograrse si se obtienen cuatro distancias a partir de información con un poco de defasamiento o ligeramente fuera de sincronía. Si los relojes del receptor fueran perfectos, entonces todas las distancias obtenidas de los satélites se intersectarían en un solo punto (que es donde se encuentra nuestra posición). Pero con relojes imperfectos, una cuarta medición, llevada a cabo como verificación, no se intersectaría con las primeras tres, entonces el receptor se da cuenta de que existen discrepancias con las mediciones y esto solamente puede significar que existe un error en su Tiempo Universal Coordinado. Y como bien se sabe, cualquier corrimiento del reloj con respecto a dicho tiempo afecta las mediciones, entonces el receptor lleva a cabo los cálculos necesarios para encontrar un factor de corrección para las señales, a fin de que todas coincidan en un mismo punto. Esta corrección hace que el reloj se sincronice con el Tiempo Universal Coordinado, la implicación de esto es muy importante, ya que significa que se tiene una base de tiempo que maneja la misma precisión que un reloj atómico, justo en la palma de la mano (http://www.trimble.com/gps/index.shtml).

Con la frecuencia estable que proporcionan los códigos pseudo-aleatorios y la sincronización de los mismos con el Tiempo Universal Coordinado, entonces las mediciones pueden efectuarse de manera sencilla con muy alta precisión. O al menos, eso nos dice la teoría.

Precisión teórica del posicionamiento

La solución de la posición calculada por un receptor GPS necesita conocer la posición de los satélites y la medición del retraso de las señales recibidas, para cada uno de ellos.

Para medir el retraso, el receptor compara la secuencia de bits (unos y ceros) recibidos desde el satélite, contra la que él genera internamente. Comparando los flancos de subida y de bajada durante las transiciones de unos y ceros (Figura 5), la electrónica puede medir el desplazamiento de las señales dentro de un margen de error del 1% de lo que dura cada pulso, esto es aproximadamente 10 nanosegundos (10×10^{-9} segundos o 10 milmillonésimas de segundo) para el código C/A. Con las señales viajando a 300 000 km/seg, esto representa un error de tres metros. Este sería el mínimo error posible utilizando sólo el código C/A de la señal GPS.

La precisión se puede mejorar usando frecuencias mayores, como la que maneja el código P. Suponiendo que se puede mantener la misma precisión de 1% en la medición de los desplazamientos de cada pulso, la frecuencia de 10 Mhz

usada en este caso, resulta en una precisión de 30 cm (http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System#Accuracy_and_error_sources).

Esta es la precisión teórica que tiene el sistema GPS realizando mediciones con el código pseudoaleatorio, sin embargo, existen algunos factores que influyen para degradarla, como aquéllos que se presentan en la sección "Errores al efectuar el posicionamiento", llamados errores de usuario; mientras que en la sección "Métodos de corrección de la posición", se describen algunas estrategias para mejorarla, como son el GPS diferencial, la medición del corrimiento de fase en las portadoras L1, L2 y los sistemas WAAS.

Mensajes de navegación

Las señales que envían los satélites de la constelación NAVSTAR son mucho más que un código pseudo-aleatorio para propósitos de sincronización. Éstas contienen también mensajes de navegación con la información de las efemérides, el estado de los relojes, información estadística, estimación de los errores en las mediciones y muchos otros parámetros.

Toda esta información es enviada a través de un protocolo de comunicación, que ha sido utilizado tradicionalmente por los sistemas de radionavegación, y que es conocido como NMEA-0183. Un protocolo de comunicación no es más que una serie de reglas que deben cumplir los programas para transmitir y recibir datos de forma ordenada (Ruiz, 2006).

Los enunciados NMEA (National Marine Electronics Association)

Para poder extraer la información de los enunciados (*sentences*) que han sido captados por los receptores GPS, es necesario saber cómo se componen y cuáles son sus funciones principales. Estos archivos pueden ser descargados del receptor y almacenarse en una PC par su uso posterior, procesarse para hacer correcciones diferenciales o emplear la información en tiempo real, para localizar un punto en el terreno o para disparar automáticamente una cámara fotográfica en un levantamiento aéreo automatizado, por ejemplo (Bermúdez y Martínez, 2001). En la Tabla 2 de la siguiente página se presenta un ejemplo donde se explica el contenido de uno de estos enunciados.

Ese es sólo un enunciado de los casi cincuenta que proporciona el protocolo NMEA cada segundo. Los valores de latitud y longitud se dan en grados, minutos y décimas de minutos. La latitud es presentada como *ddmm.mmmm* en un solo campo y la longitud como *dddmm.mmmm* en un solo campo. Los valores

Tabla 2. Ejemplo de un enunciado NMEA

$GPGGA,161555,4321.1752,N,00823.0447,W,2,08,02.3,0009,M,053,M,02,0508*47	
$	Identificador de inicio del enunciado.
GP	"Talker" (ID). Identifica el sistema de posicionamiento. GP = GPS, LG = Loran C /GPS, LC = Loran C
GGA	Es el enunciado en cuestión.
161555	Horas, minutos y segundos.
4321.1752, N	Latitud Norte.
00823.0447, W	Longitud Oeste.
2	Calidad de la posición 0= no válido, 1= Servicio de Posición Estándar (SPS mode) 2= Modo diferencial (DGPS), 3= Servicio de Posicionamiento de Precisión (PPS Precise Positioning Service). 4= RTK 5= RTK flotante (Float RTK).
08	Número de satélites captados por el receptor.
2.3	Degradación horizontal de la posición en metros.
0009,M	Altitud en metros sobre el nivel medio del mar.
053,M	Altura en metros del Geoide sobre el elipsoide WGS 84.
02	Intervalo en segundos desde la última posición.
0508	Número de identificación de la estación para corrección diferencial DGPS (Finisterre).
*47	Valor de *checksum,* es usado para verificar la integridad de los datos.

Fuente: http://gpsinformation.net/

de grados están en formato *ddd*, y los minutos y fracciones de minutos están en *mm.mmmm*. Los valores de dirección de latitud y longitud (norte, sur, este y oeste) están localizados en campos separados y representados por caracteres simples: "N", "S", "E" y "W". Los valores de tiempo están en UTC (*Universal Time Coordinated*) y son insertados en formato *hhmmss.ss*, donde *hh* son horas (00-23), *mm* es minutos y *ss.ss* son segundos y fracciones de segundos (Ruiz, 2006).

Algunos otros enunciados NMEA

En la siguiente tabla se describen brevemente algunos de los enunciados NMEA-0183. Éstos son manejados por la mayoría de los receptores, aunque algunos fabricantes tienen enunciados y protocolos de comunicación propios. Una lista más completa de los enunciados NMEA-0183 se puede consultar en: http://gpsinformation.net/.

Tabla 3. Resumen de algunas sentencias NMEA-0183

ALM	Número de semana GPS, estado de salud del satélite y datos completos del almanaque.
GBD	Detección de fallas del satélite.
GGA	Tiempo, posición y correcciones relacionadas con ellos.
GLL	Corrección de posición, corrección del tiempo y estatus.
GSA	Corrección en el modo de posición GPS, satélites usados para la navegación y valores Doppler.
GST	Estadísticas de ruido pseudoaleatorio GPS.
GSV	Número de satélites visibles, número PRN (*Pseudo-Random Noise*). Ruido pseudo-aleatorio, elevación, azimuth y valores SNR (*Signal to Noise Ratio*). Razón Señal/Ruido (Número adimensional que indica la calidad de la señal, mientras más grande sea, mejor).
RMC	Tiempo UTC, estatus, latitud, longitud, velocidad sobre la Tierra, datos y variación magnética de la corrección de posición.
VTG	Trayectoria real y velocidad sobre la Tierra.
ZDA	Tiempo UTC, día, mes, y año; número de zona local y minutos de la zona local.

Fuente: http://gpsinformation.net/

Como puede verse, la información enviada por los satélites de la constelación NAVSTAR es muy variada. Para las aplicaciones relacionadas con la geomática las sentencias: $GPGGA, $GPGSA, $GPGSV, $GPGLL, $GPRMC y $GPVTG son las más importantes, ya que proporcionan, entre otros datos: tiempo UTC, fecha, posición y altitud, velocidad, curso, rumbo, calidad de la posición, dilución de la precisión y satélites visibles.

Para llevar a cabo una campaña de obtención de puntos geodésicos, es posible pre-determinar la dilución de la posición que se va obtener en campo, esto es muy recomendable para tener una jornada exitosa. Esta información se obtiene a partir de programas encargados de la planeación de levantamientos geodésicos, que hacen uso de los datos del almanaque para calcular las posiciones de los satélites (Teunissen y Kleusberg, 2000).

Errores al efectuar el posicionamiento

En esta sección se describen los factores más importantes que influyen en el error en la solución de la posición de un GPS, como son: los retrasos que sufre la señal

al cruzar la atmósfera (efectos ionosféricos y troposféricos), errores orbitales (efemérides), la diferencia entre los relojes del satélite y del receptor, y la recepción multi-señal (NGS, 2006). A esto se le conoce como User Equivalent Receiver Errors (UERE) o errores de usuario, y se verá como influyen, junto con otros factores, en la disolución de la posición causada por la geometría de los satélites, la disponibilidad selectiva (S/A *Selective Availability*) y el encriptamiento del código P (*antispoofing*), en el error total de posicionamiento.

Retrasos atmosféricos

Las ondas de radio emitidas por los satélites GPS deben cruzar el vacío, la ionosfera y la troposfera, antes de alcanzar nuestros receptores. Las señales electromagnéticas viajan a una velocidad aproximada de 300 000 km/s, en el vacío, pero al pasar por otros medios sufren un pequeño retraso que, como bien se sabe, afecta el cálculo de la posición. La ionosfera, situada entre 60 y 180 km de altura, contiene moléculas de gas que se encuentran ionizadas por acción de la radiación solar, la conductividad producida en este medio causa un retraso que es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la señal ($\tau = K\ 1/f^2$), es decir, que a mayores frecuencias de la señal, ésta sufrirá un retraso menor (L1 a 1 575.42 MHz sufre menos retraso que L2 que trabaja a 1 227.60 MHz). Este retraso se puede modelar, pero también al emitir dos señales con frecuencias distintas es posible determinar el desfase que han sufrido ya que teóricamente deben llegar al mismo tiempo, y así se calcula el retraso ionosférico, que es difundido dentro de la señal GPS (Figura 6). Esta es la razón de que existan dos frecuencias portadoras y los receptores capaces de captarlas se les llama de *doble frecuencia*.

En la troposfera ocurren las mayores perturbaciones a las señales, causadas por la variación de la temperatura y la presencia de vapor de agua. La temperatura aporta el 90% sobre el error troposférico, pero su efecto es sencillo de modelar al utilizar el gradiente térmico de la capa. El vapor de agua aporta el 10% del error, es difícil de modelar y, por ende, de corregir.

Errores orbitales y de los relojes satelitales

La órbita de cada satélite GPS es monitoreada de manera continua desde la Tierra, y las pequeñas diferencias son transmitidas en las efemérides a los receptores, la señal de corrección es actualizada cada cuatro horas como máximo para mantener el error acotado. Los relojes atómicos de los satélites experimentan ruido y una pequeña deriva. El mensaje de navegación también contiene las correcciones para esos errores y una estimación de la exactitud del reloj atómico.

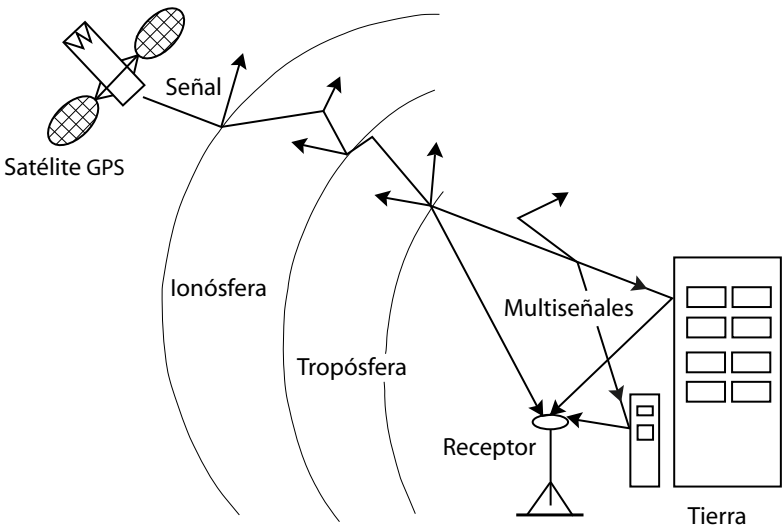


Figura 6. Retrasos en la recepción de las señales de los satélites GPS (fuente: LAGE, Instituto de Geografía, UNAM).

Recepción multi-señal

Otra fuente importante de error es la aparición de múltiples señales (*multipath*) en el receptor GPS. Esto se debe a que las señales sufren una serie de rebotes con obstáculos que causan una llegada múltiple a la antena del receptor. Como la medición de distancia a un satélite se basa en el tiempo de viaje de la señal, cuando existe recepción multiseñal, el tiempo de viaje es mayor y el cálculo de la distancia al satélite es erróneo.

En resumen, las fuentes de Error de Usuario pueden llegar a tener los valores que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Errores de usuario

Efectos ionosféricos	± 5 m
Errores por Efemérides	± 2.5 m
Errores de los relojes de los satélites	± 2 m
Distorsión multi-trayectoria	± 1 m
Efectos troposféricos	± 0.5 m
Errores numéricos al efectuar los cálculos	± 1 m

Fuente:http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System#Accuracy_and_error_sources.

Dilución de la precisión (DOP Dilution of Precision)

La precisión obtenida en un receptor GPS depende del número de satélites que se tengan a la vista y de la disposición geométrica que tengan éstos en el espacio. Este efecto es llamado dilución Geométrica de la precisión (*Geometrical Dilution of precision* o GDOP) y se refiere a la posición que guarda un satélite con respecto a los otros, pero además es una medida de la calidad de la configuración satelital, ya que puede magnificar o atenuar otros errores (Cooksey, 2006).

En general, mientras más separados se encuentren los satélites, mejor serán las mediciones realizadas. Los receptores modernos cuentan con funciones que les permiten conocer la calidad de la recepción y la posición de todos los satélites visibles y escogen automáticamente la combinación más adecuada para lograr el menor valor de GDOP posible, por esta razón es muy recomendable el uso de receptores con varios canales para efectuar un rastreo simultáneo del mayor número posible de satélites, incluyendo los de otras constelaciones como GLONASS o GALILEO, para ello, es necesario que cuenten con la circuitería adecuada para recibir estas señales. La dilución Geométrica de la Precisión es un valor adimensional de la posición espacial de los satélites en un instante de tiempo y no es representativo de una sesión completa. Mientras más grande sea su valor, peor es la solución de la posición. Un valor 4 o 5 es considerado muy bueno, mientras que un valor de 10 es considerado muy malo (http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-1-1003/c-4.pdf).

Disponibilidad selectiva S/A (Selective Availability) y "anti-spoofing"

Mediante la disponibilidad selectiva (S/A) el Departamento de Defensa de Estados Unidos intentó (y logró durante un tiempo) reservarse el derecho de lograr las mayores precisiones de GPS; introduciendo un error en las mediciones hechas por los civiles, evitando que se obtuvieran precisiones mejores que 100 m. Las limitaciones fueron introducidas manipulando los datos de las efemérides (método e) y mediante la desestabilización de los relojes del satélite (método d) ambos afectan la medición de pseudodistancias (Venegas, 2005). En mayo de 2000 se eliminó el uso de la disponibilidad selectiva.

El "Anti-Spoofing" (AS) es la restricción del código de precisión P por el segmento de control. Consiste en encriptar el código P, para transformarlo en el código protegido Y (combinación del código P con otro secreto llamado W), de modo que sólo usuarios militares tienen acceso al código P cuando el (AS) se encuentra activado.

Otras fuentes de error

Es importante saber que existen también errores a causa de las imprecisiones del modelo Terrestre utilizado (geoide, esferoide, elipsoide). Un elipsoide es una de las formas más comunes de representar a la Tierra y para describirla matemáticamente se utilizan diversas versiones; que difieren según la aplicación y la zona geográfica que se esté utilizando. Algunos ejemplos de modelos de elipsoide son: el de Clarke 1866, el GRS80 y el WGS84, siendo este último una versión del GRS80, con un pequeño cambio en el valor del achatamiento.

Los modelos que describen la forma de la Tierra no son exactos y para corregir las imprecisiones, existe una serie de redes de puntos de referencia. A estas redes se les conoce como datum y podemos mencionar, por ejemplo, el NAD27 (*North American Datum* 1927), el NAD83 (*North American Datum* 1983), el WGS84 (*World Geodetic System* 1984) y el ITRF92 (*International Terrestrial Reference Framework* 1992). A lo largo de los años cada datum se ha venido desarrollando, corrigiendo y actualizando, en respuesta a los movimientos de la corteza terrestre, pero también en buena medida a que se ha contado con equipos de medición más precisos. Sistemas como el HARN (*high accuracy reference network*) red de referencia de alta precisión, basada en receptores GPS, que funcionó en Estados Unidos entre 1987 y 1997, sirvió para mejorar la precisión del datum NAD83, pasando de 1 m a 10 cm. En la actualidad, el sistema CORS (*Continuosly operating Reference Stations*) estaciones de referencia de operación continua, sustituye las funciones del HARN, logrando que la precisión de NAD83 sea del orden de 0.02 metros en horizontal y de 0.04 metros de altura con respecto al elipsoide de referencia (NGS, 2006).

Al obtener e integrar los datos de GPS en un mapa o en un SIG, es importante saber que entre las diferentes combinaciones de modelos para describir la forma de la Tierra y cada datum puede haber diferencias de varios cientos de metros (Dana, 2006). El sistema GPS utiliza el datum WGS-84 y el centro del elipsoide WGS-84 como el origen de un marco de referencia centrado en la Tierra y fijo a la Tierra (*Earth-centered Earth-fixed*, ECEF). Esta información a veces es pasada por alto por algunos usuarios, con las consecuencias que esto implica. El datum ITRF92 época 188 es el sistema de referencia oficial que debe usarse para levantamientos geodésicos, topográficos, cartográficos y catastrales, en México.

Métodos de corrección de la posición

En la sección anterior se ha hablado de las principales causas de error en el sistema GPS, sin embargo, es importante mencionar que se han desarrollado algunos procedimientos para reducirlos al máximo, como el uso de aproximaciones estadísticas, revisión y corrección continua de los errores en tiempo real (RTK o Real Time Kinematic) o en post-proceso (GPS diferencial), medición de corrimientos de fase de las portadoras, etc. Adicionalmente, el sistema NAVSTAR ha implementado un método de mejoramiento de la precisión conocido como WAAS (*wide area augmentation system*), que consiste en el envío de señales de corrección desde un satélite geoestacionario. En esta sección se explicará el funcionamiento del GPS diferencial, el método de corrimiento de fase y se mencionará como funciona el sistema WAAS.

GPS Diferencial

Las primeras aplicaciones del GPS en el área civil estuvieron encaminadas a apoyar la navegación, obteniendo una precisión en el posicionamiento del orden de 100 m. Sin embargo, con la utilización del GPS Diferencial se han logrado mediciones dentro de un metro en aplicaciones móviles y de menos de un centímetro en condiciones estacionarias. El GPS diferencial se vale de la utilización de dos receptores: uno de referencia y uno móvil, el primero es estacionario y se coloca en un sitio del que se conocen exactamente sus coordenadas, el segundo es el receptor del cual se quiere resolver su localización. El receptor estacionario compara las mediciones de los satélites contra su posición exacta, y genera una señal de corrección. Básicamente mide los errores de sincronización y luego transmite mensajes de corrección hacia todos los receptores de los alrededores. Como los satélites están tan lejos en el espacio (22 000 km), unas cuantas decenas de kilómetros de separación entre los receptores, significa que las señales que alcancen a ambos tendrán aproximadamente los mismos retrasos y errores.

La estación de referencia recibe la misma información que los receptores móviles, pero resuelve el problema de posicionamiento de manera inversa; en lugar de usar las señales de sincronización para calcular su posición, utiliza su posición ya conocida para medir los retrasos en la sincronización de las señales que recibe. Esta diferencia en tiempo da pie al cálculo de un mensaje de corrección, que puede ser enviado en tiempo real hacia los receptores en movimiento para corregir sus mediciones en ese instante (modo cinemático en tiempo real), o los datos pueden ser almacenados para hacer las correcciones en post-proceso (Ruiz, 2006). En aplicaciones geodésicas, en modo estático, con este método es

posible obtener una precisión de 1 a 2 cm utilizando receptores que cuentan con una sola banda (L1) y de menos de 1 cm con receptores que manejan dos bandas (L1 + L2). En modo dinámico la precisión que se obtiene es de 1 a 2 m; cuando se efectúa en tiempo real (esto sólo es posible con L1+L2) y de 30 a 50 cm utilizando post-proceso.

El sistema CORS tiene también la función de proveer datos de corrección para efectuar GPS diferencial para aplicaciones de posicionamiento, navegación y geofísica. Este sistema permite ahorrar recursos, ya que no es necesario colocar un GPS estacionario en un punto geodésico para efectuar mediciones de precisión. Los datos de corrección se radian en tiempo real y se encuentran disponibles para post-proceso en la página electrónica del *National Geodetic Survey* (NGS, 2006b). En México, el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) cuenta con 16 estaciones de referencia que proporcionan el mismo servicio. Éstas se encuentran distribuidas a lo largo y ancho del país e integradas al sistema CORS. Aunque su número es muy limitado, proporcionan un apoyo para la obtención de soluciones de posición. Los archivos captados por los receptores GPS de la Red Geodésica Nacional (RGNA), se encuentran en formato RINEX versión 2.0 (*Receiver Independent Exchange Format*) intercambio de formato independiente del receptor, en bloques de observaciones de una hora, su intervalo de registro es cada 15 segundos y se encuentran empaquetados en formato ZIP. Además de los datos de corrección, un archivo RINEX de observaciones proporciona: nombre de la estación, tipo de receptor usado, tipo de antena y altura de la misma, y tiempo de inicio y término de las observaciones. Los archivos de la RGNA se encuentran disponibles durante un periodo de 90 días naturales, los previos se consideran extemporáneos. Se cuenta con acceso directo a los mismos y se puede especificar la estación y el periodo de observación requerido, para bajar sólo los datos necesarios (INEGI, 2006).

WAAS

El WAAS (*Wide Area Augmentation System*) o Sistema de Aumentación de Gran Área, es un sistema de satélites y estaciones terrestres que proveen correcciones a la señal GPS, mejorando hasta cinco veces la precisión de la posición calculada. Un receptor dotado con la opción WAAS entrega una precisión en la posición de menos de tres metros 95% del tiempo y no requiere equipo adicional (Ruiz, 2006).

La Administración Federal de la Aviación (FAA, Federal Aviation Administration) y el Departamento de Transporte (DOT, Department of Transportation) de los Estados Unidos, desarrollaron el programa WAAS para usarlo en la aviación comercial, ya que la señal original de GPS no llenaba los requerimientos de

navegación de la FAA en precisión, integridad y disponibilidad. WAAS corrige los errores orbitales (efemérides), de sincronización y aquéllos causados por la ionosfera, además de que evalúa la integridad de la información. El sistema WAAS ya está en operación en los Estados Unidos, Canadá y México y pronto este servicio se extenderá alrededor de todo el mundo. Esta aplicación es una prueba de la confiabilidad e integridad del sistema GPS para proporcionar un servicio de localización en tiempo real para operaciones tan delicadas como la navegación en rutas transcontinentales y la aproximación para aterrizaje.

WAAS consta de 38 estaciones de referencia, 29 localizadas en los Estados Unidos, cuatro en Canadá y cinco en México, que monitorean la información de los satélites GPS y determinan los errores de sincronización. Estos datos se concentran en dos estaciones maestras donde se generan las señales de corrección, que son enviadas a cuatro satélites geoestacionarios de la serie INMARSAT III, (AOR-W, AOR-E, IOR y POR). El mensaje de corrección es entonces transmitido a todos los receptores de los usuarios (gpsinformation, 2006b). La información es compatible con la estructura básica de GPS, lo que significa que cualquier receptor puede leer la señal WAAS, como si se tratara de un canal más. Aunque las señales de corrección WAAS están dirigidas esencialmente para Estados Unidos, la experiencia ha demostrado que la calidad de la solución de la posición se mejora en países cercanos, como México. La señal de corrección WAAS está disponible en prácticamente todo el mundo debido a la huella de cobertura de los satélites geoestacionarios que la transmiten, sin embargo, la señal no tiene las correcciones adecuadas para todo el planeta. WAAS provee una cobertura mayor que los sistemas basados en tierra, como el CORS, mencionado anteriormente; sin embargo, no proporciona la misma precisión. Otros gobiernos están desarrollando sistemas de mejoramiento de la precisión parecidos a WAAS; en Asia se tiene el Sistema Japonés de Aumentación Satelital Multifuncional (MSAS, *Multi-functional Satellite Augmentation System*), mientras que en Europa está el Servicio de Cobertura para Navegación Euro-Geoestacionario (EGNOS, *Euro-Geostationary Navigation Overlay Service*; Garmin, 2006). Más aún, la Unión Europea y la República Popular de China están por lanzar sus propias constelaciones de satélites: los sistemas GALILEO y COMPASS, que entrarán en funciones en el 2013 y en el 2015, respectivamente y se unirán a NAVSTAR y GLONASS en el servicio de posicionamiento y navegación en el ámbito mundial. Esto habla del auge que tienen los sistemas de navegación basados en constelaciones satelitales (NGS, 2006a). Se prevé que para el 2013 eventualmente todos los usuarios de GPS alrededor del mundo tendrán acceso a un posicionamiento de 1 a 3 m con receptores portátiles.

Corrimiento de fase de las portadoras L1-L2

La medición del corrimiento de fase de las portadoras L1 y L2, vino a revolucionar los levantamientos de puntos de control terrestres. Esto debe hacerse en modo diferencial utilizando las bandas L1 y/o L2, lo que significa que la base y el receptor deben estar monitoreando al mismo tiempo los corrimientos de fase de las portadoras, utilizando para ello circuitos especiales. Con este método es posible determinar posiciones con errores del orden de milímetros, ofreciendo un cambio sustancial comparado con el uso únicamente de la medición del código pseudoaleatorio, descrita en la sección "Precisión teórica del posicionamiento". Esta mejora es más completa cuando se utilizan las dos bandas L1+L2 (Teunissen y Kleusberg, 2000). En la Tabla 5 se presenta un comparativo histórico de precisiones con las diferentes opciones de GPS que se han manejado.

Aplicaciones de los GNSS

Los GNSS han demostrado, con creces, ser la cura para los problemas de posicionamiento y navegación que la humanidad ha enfrentado desde sus orígenes. Para la geomática, ciencia y técnica que reúne, almacena, procesa y entrega información espacialmente referenciada (wikipedia, 2009), las constelaciones satelitales han abierto un inmenso abanico de posibilidades al permitir situar puntos con gran precisión, para disciplinas como la geodesia, la topografía, la cartografía, la navegación, la percepción remota, la fotogrametría y los sistemas de información geográfica (todos ellos parte de la propia geomática).

Tabla 5. Comparativo de precisión en el posicionamiento con GPS

100 m	Precisión original del sistema GPS, sujeto a degradación por la restricción de Disponibilidad Selectiva (S/A).
15 m	Precisión en la posición típica sin S/A.
3 m	Precisión típica con sistema WAAS.
1-2 m	Precisión diferencial en modo dinámico RTK_DGPS *(Real Time Kinematics*_Differential GPS). Modo cinemático en tiempo real GPS diferencial.
.3-.5 m	Modo cinemático en post-proceso.
1-2 cm	Precisión diferencial en modo estático (L1).
Menos de 1 cm	Precisión diferencial en modo estático (L1+L2).

La geodesia, ciencia matemática que tiene por objeto determinar la forma y dimensiones de la Tierra, hace uso de esta tecnología, al obtener la solución precisa de un punto en la Tierra a partir de mediciones satelitales, lo que ha permitido determinar la distribución irregular de masas y su dinámica superficial. Esto ha contribuido de una manera importante al mejoramiento de los sistemas de referencia terrestres como el ITRF92, que se mencionó con anterioridad, sin embargo, es necesario señalar sus limitaciones en precisión comparado con otros sistemas como el que efectúa mediciones interferométricas de base muy grande Very Large Base Interferometry (VLBI) para determinar marcos globales de referencia terrestre y celeste, o la medición de distancias con láser desde satélite, Satellite Laser Ranger (SLR), para establecer el centro de la Tierra y el campo potencial terrestre; sólo la combinación de las tres técnicas nos puede dar una respuesta para todas las preguntas relevantes en el campo de la geodinámica (Teunissen y Kleusberg, 2000).

Las aplicaciones topográficas, con fines de control terrestre, han encontrado una precisión sin precedentes. Hoy en día es difícil prescindir del uso del GPS para la determinación de puntos de precisión en el terreno para aplicaciones en obras civiles como: la verificación de dimensiones de terrenos y construcciones, el establecimiento de bases de referencia de alta precisión en obras lineales de largo recorrido como carreteras, ferrocarriles, etc., y de obras tan importantes como la construcción de túneles, puentes y presas.

Otra aplicación importante del GPS es en el mapeo de carreteras o de calles en las ciudades. El uso de esta tecnología permite generar o actualizar dichos mapas, así como también efectuar de manera más rápida y confiable tareas de catastro, de ordenamiento territorial, de cartografía censal y de recursos naturales.

En fotogrametría, la utilización conjunta de GPS con los sistemas de navegación inercial (SNI) proporciona información crucial para la generación de mapas ortorectificados. El GPS proporciona los datos de la posición geográfica de cada toma fotográfica, lo que permite referenciar cada imagen con el terreno, mientras que el SNI proporciona los ángulos de orientación de la cámara al momento de la toma, lo que permite corregir las distorsiones en las imágenes, causadas por los movimientos de la aeronave durante el levantamiento.

En la obtención de modelos tridimensionales del terreno usando LIDAR (*Light Detection And Ranging*) medición de distancias por medio de luz, mientras la aeronave avanza, un rayo de luz láser barre de manera secuencial la zona en estudio, enviando pulsos de corta duración que golpean el terreno y retornan a la nave donde es calculada su distancia. El sistema GPS proporciona la localización geográfica correspondiente a cada pulso emitido por el láser, mientras que el

sistema inercial establece los ángulos de orientación de la nave. Esta información es necesaria para determinar el lugar exacto del terreno donde golpeó el rayo. Al procesar la información en tierra, es posible reconstruir la posición de cada punto y generar un modelo detallado de la zona en 3D.

Como se ha visto, el GPS se ha convertido en una herramienta indispensable en la navegación para determinar la posición de manera instantánea y continua de cualquier vehículo sobre el mar, la tierra o el aire. Y debido a que permite la navegación precisa en tiempo real con un alto margen de confiabilidad, se ha aprobado su utilización para la navegación aérea comercial en etapas de crucero de largo alcance y de aproximación. Esto sin duda evitará muchos errores de navegación y será un apoyo muy importante en la realización de aterrizajes en condiciones meteorológicas adversas.

Existen muchas otras aplicaciones, como la determinación de la orientación de buques, aeronaves o satélites en órbita terrestre; ya que haciendo uso de dos antenas GPS colocadas en la parte extrema de un eje de referencia, se puede determinar la desviación del mismo. En áreas como protección civil, se usa para la búsqueda de personas o evaluación de daños. En el área militar se utiliza en la navegación, el guiado de misiles, el apuntamiento de artillería, localización de tropas, etc. Una aplicación interesante es la detección de tsunamis, a través de la ubicación de receptores GPS en boyas, lo que permite enviar una señal de alerta temprana a las zonas costeras. Los nuevos satélites GPS, que apartir del año 2000 constituyen la fase III del sistema NAVSTAR, van mejorando sus características, a través de nuevas señales (GPS III: http://www.globalsecurity.org/space/systems/gps_3.htm):

- L2C: cuenta con dos nuevas secuencias de códigos pseudoaleatorios para la medición de los retrasos de las señales (2005).
- Código M: de uso militar, tiene mejores características contra interferencias y códigos de seguridad. (Disponible hasta 2013.)
- L5: utilizada para salvamento, señales de SOS. (A partir de 2009.)
- L1C: Mejor interoperabilidad con el sistema GALILEO. (Disponible en 2013.)

Referencias

Bermúdez, R. y U. Martínez (2001), *Despliegue y almacenamiento de datos para un sistema de adquisición de imágenes aéreas*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Becerril, J. M. y M. Rodríguez (2000), *Sistema de navegación inercial basado en giróscopos y acelerómetros*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Cooksey, D. (2006), *Understanding the Global Positioning System (GPS)*,. Department of Land Resources and Environmental Sciences, Montana State University-Bozeman. http://www.montana.edu/places/gps/understd.html#Geometric_Dilution_of_Precision_(GDOP)

Dana, P. H. (2006), http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/datum/datum.html).

Encarta (2006), http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_761576060/Geodesia.html.

Garmin (2006), http://www.garmin.com/

Global Positioning System (2006), http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo4/index.html

gpsinformation (2006a), http://www.gpsinformation.org/.

gpsinformation (2006b), http://gpsinformation.net/exe/waas.html.

Davies, H. (2006), http://www.henry-davis.com/MAPS/Ancient%20Web%20Pages/AncientL.html

Historia de la Navegación (2006), http://www.math.nus.edu.sg/aslaksen/gem-projects/hm/0203-1-30-navigation/HistoryNavi.html.

INEGI (2006), http://www.inegi.gob.mx.

Lawrence, A. (1998), *Modern Inertial Technology*, Springer Verlag, Berlin, Alemania.

Merhav, S. (1993), *Aerospace sensor systems and applications*, Springer, New York.

NGS (2006a), http://www.ngs.noaa.gov/CORS/CorsPP/A-SlideShow/sld001.htm.

NGS (2006b), http://www.ngs.noaa.gov/CORS/

Ruiz, S. (2006), *Almacenamiento y manejo de datos a altas tasas de velocidad en un LIDAR*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Teunissen, P. J. G. and A. Kleusberg (eds.; 2000), *GPS for geodesy*, Springer Verlag, Berlín.

Titterton, D. H. and J. L. Weston (1997), *Strapdown inertial navigation technology*, Peter Peregrinus Ltd. Herts, United Kingdom.

Trimble, Co (2006), http://www.trimble.com/gps/index.shtml

Usace (2006), http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-1-1003/c-4.pdf

Venegas, J. (2005), *Diseño de un sistema LIDAR de bajo costo para generación de mapas topográficos*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, pp. 1-90.

wikipedia (2009), http://en.wikipedia.org/wiki/Geomatics, y http://en.wikipedia.org/wiki/Turin_Papyrus_Map).

Capítulo 4. Definición y origen de los sistemas de información geográfica

José Antonio Quintero Pérez
Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE)
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Escribir sobre la historia de los sistemas de información geográfica (SIG) en México remite a los trabajos de Roger Tomlinson, Waldo Tobler y otros más. Hablar de la historia de los SIG en cualquier parte del mundo es hablar del desarrollo de tecnologías, herramientas y disciplinas, sin las cuales no existirían los sistemas como hoy los conocemos. Tres son las disciplinas que sentaron las bases para que se originaran los SIG como se conocen en la actualidad: la geodesia, que se encarga de la forma y las dimensiones terrestres; la cartografía, que se ocupa de la representación de la Tierra y sus transformaciones a un plano; y la geografía, que estudia la distribución espacial de las actividades humanas y su relación con el mundo físico.

Para hablar de la historia de los SIG en México es necesario hablar de estas tres disciplinas en Occidente, desde el punto de vista de su evolución, ya que del Viejo Mundo recibimos, una vez conquistados, influencia de todas las escuelas conforme éstas fueron cobrando auge y desarrollándose, sin dejar de lado que el México precolombino tenía su propia cartografía y sus estudiosos de la geografía; legado que hasta la fecha tiene grandes implicaciones en la tenencia de la tierra y en la toponimia del territorio a través de los mapas o códices que aún se conservan.

Si se revisa la literatura en torno a los SIG, se encontrará que todos los autores hacen mención de su historia desde los años sesenta, y que todos tienen un común denominador en sus textos, como el hecho de que se desarrollaron a la par de las computadoras y que sin éstas no existirían los SIG; que el primer SIG oficialmente se le concede a los canadienses, y sus descripciones continúan hasta los primeros software comerciales y todas sus variantes hasta el día de hoy, sin dejar

de mencionar el desarrollo de las bases de datos, la percepción remota, la estadística, los sistemas de posicionamiento global o GPS, el análisis espacial, etc.; todas estas herramientas ya existían y se venían utilizando desde las primeras civilizaciones o desde que el hombre moderno existe y lo único en lo que se ha avanzado es en acelerar los procesos de análisis espacial conjuntando más de una de estas herramientas en un software para generar resultados y representarla en un mapa con mayor precisión y exactitud, usando volúmenes mayores de información.

Un ejemplo podría ser la Percepción Remota (PR), tecnología que siempre ha estado ligada a los SIG desde sus orígenes y no me refiero a los primeros satélites. Si por un instante se gira un satélite de observación terrestre 180° para ver la Luna, en vez de la superficie terrestre, se le llamaría astronomía y esta actividad es más conocida por Galileo, quien registra en 1609 el primer instrumento para ver a distancia llamado telescopio. Este invento que se le atribuye a un holandés fabricante de lentes Hans Lippershey en 1608, y que es utilizado años más tarde (en 1783) desde un globo aerostático para ver desde el espacio y hacer un dibujo de las observaciones, tarea que se facilitó con una cámara fotográfica en 1858, la cual tiempo después se utilizaría desde un avión en 1908 y así sucesivamente hasta los actuales satélites (Jensen, 2000), por lo que se podría decir que la PR existía desde el siglo XVII, pero la observación de los astros, su estudio y aprovechamiento no comienza con Galileo Galilei.

Toda civilización antigua cuenta con observaciones astronómicas con las cuales erigieron sus respectivos imperios, utilizando las estrellas y las sombras generadas por el Sol y la Luna para orientar sus construcciones y crear sus calendarios, algunas de estas civilizaciones fueron grandes navegantes y la observación del firmamento les proporcionaba los medios para hacer sus mediciones y orientarse en la mitad de la nada, si se continúa retrocediendo en el tiempo hasta la prehistoria, se encontrarán pinturas rupestres que se cree representan estrellas alrededor del año 16500 a.C., a manera de cartas celestes. Siguiendo estas premisas, se puede decir que la PR siempre ha existido y ha estado presente en la creación de mapas. Tom Alföldi, investigador del Canadá Centre for Remote Sensing (CCRS), alguna vez expresó: "la Percepción Remota es hacer astronomía en la dirección contraria".

Haciendo un último comparativo, estas civilizaciones no tenían un sistema de GPS basado en satélites artificiales pero los astros cumplían con la misma función. En la actualidad se tiene un dispositivo portátil o GPS que directamente da los números que indican la posición y el rumbo que se lleva. Antes tenían que calcularse a mano midiendo dos o más ángulos con la dioptra, más tarde con un astrolabio, el cual fue remplazado por el sextante por tener más precisión y obte-

ner la latitud en la que se encontraban. Conociendo la hora del día, una brújula para marcar el rumbo y haciendo anotaciones con papel y lápiz en una bitácora, se hacían las matemáticas necesarias en vez de utilizar una base de datos o una hoja de cálculo como se hace actualmente. Recordando los primeros GPS vemos que la historia se repite, al principio manejaban un error grande como el astrolabio, para después substituirlo por equipos diferenciales o submétricos como el sextante, valga la comparación; finalmente, en lo que se ha progresado es en acelerar el proceso de obtener esos números que nos indican en dónde y el hacia dónde, pero la aritmética que dio origen a estas herramientas es básicamente la misma. Cabe mencionar que hoy en día se siguen utilizando las técnicas clásicas en la navegación marítima, con cartas que muestran mareas, boyas, profundidad, declinación magnética, etc., y con la ayuda de una regla, compás y transportador se trazan las rutas de un puerto a otro, donde el GPS solamente es un instrumento secundario para confirmar los cálculos hechos a mano, de igual forma en la aviación las cartas aéreas continúan vigentes marcando radiofaros, corrientes, alturas, elementos de referencia, etc., y el GPS es un instrumento de navegación auxiliar.

¿Qué es un SIG?

Definir que es un SIG es un problema. Definiciones de SIG hay como autores de libros y artículos existen en la materia. Cada cual genera la suya desde su perspectiva y el uso que le esté dando al sistema agregando o quitando elementos de los enunciados originales con la finalidad de innovar en su campo de conocimiento, pero esto ha causado que una definición universal que describa qué es un SIG no exista. Mientras para el público en general no es más que un contenedor de mapas digitales que se confunden con paquetería de dibujo y diseño, para grupos de planeación es una herramienta de toma de decisiones. Hay administradores de recursos que los interpretan como una forma sofisticada de llevar un inventario, mientras la comunidad científica lo utiliza para revelar lo que de otra forma les sería invisible a simple vista; o analistas y técnicos de diferentes áreas que lo utilizan como una herramienta para realizar operaciones en datos que son tediosos, tardados o inexactos si se realizan a mano. Cada grupo de trabajo tiene su propia idea de lo que es un SIG y no sólo eso sino que también modifican el nombre de esta herramienta por el de la tarea que estén realizando, o le ponen el nombre del departamento en el que trabajan como: Sistema de Información Terrestre, Sistema de Información Científico, Sistema de Información Catastral, Sistema de Información Geoespacial, Sistema Espacial para Toma de Decisiones, Departa-

mento de Mapas Inteligentes, Sistema Geográfico de Ordenamiento Territorial, Sistema de Información Territorial, Sistema de Información "Geo…algo…", etc., los administradores o usuarios de dichos sistemas hacen lo mismo con mayor o menor grado de complejidad y en ocasiones los títulos suenan más rimbombantes que el análisis que están efectuando (si es que están haciendo alguno), por lo que se hace un poco más difícil dar una definición universal.

Como parte de este esfuerzo por descifrar qué es un SIG, hay dos definiciones que podrían facilitar o complicar más la idea. Una definición formal sería que es una herramienta de análisis espacial para resolver problemas por medio de modelos que permiten encontrar patrones y entender cuáles son los eventos que dan origen a los fenómenos que se estudian; de manera informal podría ser el arte de expresar de la forma más abstracta posible la realidad. El uso de los SIG con esta primera definición está orientada a responder preguntas como ¿por qué un evento se da en un cierto espacio y tiempo y no en otro?, ¿cuáles son los factores que desencadenan ese evento, y cuál es su distribución?, ¿existe un patrón espacial o es un fenómeno azaroso?

En esta definición entiéndase por problema un 'problema espacial' como el planteamiento de una ecuación donde intervienen parámetros métricos, de organización y topológicos que deben ser desglosados en componentes más pequeños para su análisis y con esto me refiero a sus causas y consecuencias, y que sólo mediante el estudio de sus partes se podrán plantear y responder preguntas que estén enfocadas en dar un mejor entendimiento de cómo se desarrollan las actividades humanas y naturales recordando que "todo está relacionado con todo, pero los objetos cercanos están más relacionados que los que están distantes"; primera ley de la Geografía mejor conocida como autocorrelación espacial (Tobler, 1970).

La segunda definición se deriva de que todo modelo es una abstracción de la realidad donde no existe bueno o malo sino donde uno es mejor que el otro, dependiendo del número de variables que se estén manejando, pasando por la calidad de la información que se utilice, como manejar los errores, el planteamiento conceptual, el diseño lógico y su implementación física de entre otros conceptos.

El término "sistemas de información geográfica" fue acuñado originalmente por el Geógrafo Roger Tomlinson en 1963 (Longley y Batty, 2003). Tomlinson se unió al gobierno de Canadá a principios de los años sesenta para realizar el primer inventario de los recursos naturales de ese país y como resultado de este esfuerzo desarrolló y dirigió lo que se considera el primer SIG funcional, por lo que históricamente se le conoce como el primer sistema de este tipo con el nom-

bre de "Canada Geographic Information System (CGIS)" en 1963 (Longley *et al.*, 2001).

El segundo en importancia se dio a finales de los sesenta en el Buró de Censos de Estados Unidos para el censo de población de 1970, donde se diseñó el programa "Dual Independent Map Encoding" (DIME), para crear archivos digitales de las calles que soportaran referencia automática y agregar los registros del censo de población utilizando el nombre de la calle, el número y la ciudad; en otras palabras, el primer sistema de geocodificación bajo el concepto de topología en 1967 (*Ibid.*). Después de estos dos hechos comienzan a surgir sistemas de información en otras partes del mundo, con diferentes grados de complejidad y propósitos, algunos con mayores aportaciones que otros pero bajo los mismos principios de análisis geográfico, la distribución de las actividades humanas, la búsqueda de esquemas que den respuesta a actividades económicas, culturales, sociales y físicas, la búsqueda de relaciones espaciales y su conducta, que dan origen a un evento en el tiempo y en el espacio: generar modelos que permitan representar una organización espacial estructurada que responda a preguntas básicas, ya sea con fines de explotación, inventarios, conservación, planeación y desarrollo, entre otras, o directamente aplicadas al transporte, comunicaciones, comercio, por mencionar algunas.

Si se revisa nuevamente la historia, se encontrará que estos análisis geográficos ya se practicaban mucho antes de que sus principios fueran enunciados, encontrando trabajos en diferentes áreas como el militar, la medicina y la conservación, entre otras. Como ejemplo de esto se puede citar el trabajo de John Snow en 1854, año en el que el centro de la ciudad de Londres sufre de una epidemia de cólera por una fuente de agua contaminada en el área del Soho. El doctor Snow encuentra el foco de infección mapeando el número de muertes casa por casa, calle por calle, y sacando la distancia de éstas al pozo de agua en cuestión, el cual se encontró en el centro de un "mapa de distribución" (Longley *et al.*, 2001; Kent y Hall, 1998); este tipo de análisis es conocido hoy en día como *point pattern analysis* y es un modelo ampliamente utilizado en epidemiología (Fotheringham *et al.*, 2000). Otro ejemplo es el cartógrafo francés Louis-Alexandre Berthier quien muestra el movimiento de las tropas francesas y americanas en 1781 en la batalla de Yorktown en la revolución americana (Kent y Hall, 1998). En una secuencia de mapas temáticos por fechas y en diferentes escalas muestra un inventario de tropas y el desplazamiento de éstas a través de los campos de batalla, lo que permite ver no sólo el avance y ubicación de las tropas aliadas franco-americanas sino conocer la situación de las tropas británicas que terminaron rindiéndose el

19 de octubre, habiéndose creado un hito con la sobreposición de diferentes capas temáticas sobre una cartografía base relacionada espacialmente.

En el México precolombino se tiene que la ciudad de Tenochtitlán se caracterizó por el equilibrio que guardaba con la naturaleza que la rodeaba y que fueron los mismos aztecas quienes, incluso, elaboraron obras que, además de funcionales, en algunos casos mejoraban el ecosistema, como es el caso del gran albarradón que Moctezuma I mandó construir para separar el agua dulce del Lago de México al Oeste, de las aguas salobres del Lago de Texcoco al Este, basándose en mapas o *amatohtls* que tenían la función de mostrar la ubicación de las objetos. Otros reyes aztecas se esforzaron por lograr que el daño al medio fuera mínimo, como Netzahualcóyotl, fundador de pequeños parques zoológicos, jardines botánicos y gran defensor de la naturaleza, quien incluso con crueles castigos obligaba a sus súbditos a respetar árboles y animales, evitando su explotación excesiva (Martínez, 1972), incluso llevaba inventarios en *amahohtlis* o cartas que cumplían la función de cuantificar y administrar su explotación.

Estos ejemplos tienen algo en común, el análisis del espacio geográfico mediante el uso de mapas. Desde el comienzo de los tiempos, la principal función de los mapas, sin importar su origen o los materiales que le dieron vida, ha sido ubicar al ser humano en su contexto espiritual, así como en un contexto físico y geográfico donde todo mapa comienza como una superficie en blanco y trazo a trazo es dibujada la distribución de rasgos o características reales o imaginarias de la Tierra. De hecho, las marcas o signos que dan forma a una distribución espacial son el mapa *per se*, y su representación los agrupa en pictóricos y no-pictóricos. Los mapas con símbolos pictóricos son también llamados gráficos o ilustrativos y se caracterizan por transmitir, mediante signos, ideas completas que requieren de poca o ninguna explicación ya que el contexto espacial en el que están enmarcados los hacen comprensibles, y los mapas mediante signos no-pictóricos siempre necesitan una explicación ya sea oral o escrita donde el significado de cuadrados, rectángulos, círculos, líneas punteadas, puntos, etc., pueden volverse incomprensibles, ya que cada autor le puede dar su propio significado a cada forma y no necesariamente es la misma interpretación de otros autores.

Pero todo esto nos lleva a otra pregunta, ¿qué es un mapa? Durante los últimos 20 años la mayor parte de los estudios académicos han aceptado la definición formulada en 1987 por Brian Harley y David Woodward al inicio del primer volumen de su monumental obra, aún inconclusa, *Historia de la Cartografía*, que dice que 'los mapas son una representación gráfica que facilita el entendimiento espacial de objetos, conceptos, condiciones, procesos o eventos en el mundo humano'. Este concepto de mapa o carta como también se le conoce

según la escuela de la que se esté hablando (francesa o inglesa, respectivamente), es el elemento básico para hacer cualquier tipo de análisis espacial por más sencillo que éste sea, por lo que se convierte en un extremo del eje sobre el que gira un SIG. Una característica que diferencia a un SIG de otro software, es la capacidad de manejar relaciones espacio-temporales entre diferentes objetos de un mismo tema o de varios al mismo tiempo, para así agruparlos y llevar a cabo un análisis, lo cual se convierte en el otro extremo del eje que soporta a un SIG. A esta línea imaginaria o eje soportado por un mapa en un extremo y su relación de espacio y tiempo en el otro, se puede considerar como la secuencia de procesos por los que los datos crudos son transformados en información útil, llamando a este proceso análisis espacial o como muchos autores lo exponen "la cruz del SIG", en otras palabras, el manejo de los atributos es el secreto de un SIG, sin éstos se convertiría en un paquete de dibujo más y por desgracia para mucha gente es sólo eso.

Si se revisara a detalle la historia se encontrarían innumerables ejemplos del uso de los mapas. Cada mapa creado a lo largo de la evolución de la cartografía tenía un fin específico y algún tipo de análisis. Antes de que el término "análisis espacial" cobrara vida existía el de "cartografía analítica", utilizado para referirse a los métodos que se manejaban sobre los mapas para hacerlos más útiles y eficientes, siendo el análisis espacial el sucesor lógico de esto. El término "análisis espacial" se puede rastrear desde principio de los años cincuenta y diez años después se convirtió en un término muy utilizado en SIG. Es definido como una colección de técnicas y modelos que explícitamente utiliza el uso de la referencia espacial asociada con cada uno de sus datos u objetos que son especificados dentro del sistema que se estudia. Hablar de análisis espacial también implica retroceder en el tiempo hasta los griegos donde se establecen las primeras reglas topológicas, teorías de conjuntos y demás modelos matemáticos que dan origen a los algoritmos actuales; pero por ahora no es el tema en cuestión, era necesario hacer mención de su existencia y el papel que juega en un SIG hoy en día. Retomando nuestra pregunta inicial de que es un SIG, tal vez sería más fácil explicar que no es y dar una explicación para cada punto que se mencione pero sería entrar en otros temas que por ahora no tienen que ver con este capítulo; así para redondear la pregunta inicial se cerrará esta parte con algunas citas que provienen de diferentes puntos de vista, formaciones e ideologías y cuyas explicaciones se encuentran resumidas por D. J. Maguire en Longley (*et al.,* 1999) esperando que ayuden a comprender un poco más a esta herramienta. Un SIG es:

Un sistema para capturar, almacenar, revisar, manipular, analizar y desplegar datos que están espacialmente referidos a la Tierra (DoE, 1987:132; tomado de Longley *et al*., 1999).

Cualquier tipo de procedimientos manuales o automáticos usados para almacenar y manipular geográficamente datos referenciados (Aronoff, 1989:39; tomado de Longley *et al.*, 1999).

Una entidad institucional que refleja una estructura de organización que integra tecnología con bases de datos, experiencia y soporte financiero continuo a lo largo del tiempo (Carter, 1989:3; tomado de Longley *et al.*, 1999).

Una tecnología de información que almacena, analiza y despliega datos espaciales y no-espaciales (Parker, 1988:1547; tomado de Longley *et al.*, 1999).

Un caso especial de sistemas de información donde la base de datos consiste en observaciones de rasgos distribuidos espacialmente, actividades o eventos que son definidos en el espacio como puntos, líneas o áreas. Un SIG maneja datos de estas representaciones recobrando información *ad hoc* a través de consultas y análisis (Dueker, 1979:106; tomado de Longley *et al.*, 1999).

Un sistema de base de datos en el cual la mayor parte de la información está espacialmente indexada, y donde los procedimientos de operación están basados en un orden para resolver consultas espaciales de la base de datos (Smith *et al.*, 1987:13; tomado de Longley *et al.*, 1999).

Un conjunto de funciones automáticas que proporciona a los profesionales avanzadas habilidades para almacenar, recuperar, manipular y desplegar datos localizados geográficamente (Ozemoy *et al.*, 1981:92; tomado de Longley *et al.*, 1999).

Un poderoso juego de herramientas para colectar, almacenar y recuperar a voluntad, transformando y desplegando datos espaciales del mundo real (Burrough, 1988:6; tomado de Longley *et al.*, 1999).

Un sistema de soporte de decisiones que involucra la integración de datos espacialmente referenciados orientado a resolver problemas ambientales (Cowen, 1988:1554; tomado de Longley *et al.*, 1999).

Un sistema con capacidades avanzadas de geomodelación (Koshkariov *et al.*, 1989:259; tomado de Longley *et al.*, 1999).

Una forma de sistema de información de gerencia que permite desplegar mapas de información en general (Devine y Field, 1986:18; tomado de Longley *et al.*, 1999).

El origen de los SIG

No se intenta con esta reseña histórica abarcar todos los hechos que dieron origen a la geografía, la cartografía y la geodesia; con la finalidad de ubicar en el contexto mundial a estas disciplinas de nuestro país, se hará una pequeña revisión de éstas desde que aparece el hombre moderno en la prehistoria hasta nuestros días en el mundo Occidental, ya que de éste es de quien recibimos influencia durante la conquista y la colonia, sin perder de vista, aunque no se toque aquí, que Occidente se formó por conocimiento generado en Oriente y Oriente Medio.

Los SIG evolucionaron a través de siglos de hacer mapas, o mejor dicho de la evolución de la cartografía, aunque en un principio esta disciplina no existía como tal. La cartografía es considerada como un vínculo entre el hombre y el espacio que tiene un origen y una evolución paralela al de la escritura y que podría ser considerada como un segundo lenguaje.

Entre 35 y 30 000 años atrás, a finales de la última glaciación el hombre de Cro-Magnon dibuja escenas de su vida cotidiana –relatos de sus cacerías en las paredes de cuevas como Chauvet, La Grèze, Pair Non Pair, entre otras tantas. Estas representaciones icónicas no sólo eran un lenguaje de comunicación y expresión artística como el hombre moderno lo ve, aparte de representar probablemente el deseo de influir mágicamente en el éxito de su cacería; sin saberlo, también contienen elementos básicos de la estructura moderna de un SIG. Detrás de las figuras de animales como mamuts y gacelas perseguidos por figuras de seres humanos cazándolos, hay líneas que describen rutas migratorias, así como rasgos del paisaje que los rodeaba, siendo éstos los puntos de referencia espacial como cuerpos de agua, montañas y valles. En una simple comparación con nuestros modelos geográficos actuales, estas pinturas rupestres son una representación gráfica con atributos, siendo estas dos propiedades esenciales para cualquier tipo de análisis. Es probable que los primeros mapas no fueran de la Tierra sino de los cielos, como las representaciones en las paredes de las cuevas de Lascaux (Brodrick, 1981) en el suroeste Francia, donde encontramos dibujos que datan de

16 500 años a.C. que representan el cielo nocturno, incluyendo las tres estrellas más brillantes como Vega, Deneb y Altaír (grupo de estrellas conocido como el triángulo de verano), y en España en los dibujos que datan del 12000 a.C. en la cueva de El Castillo, que representan la constelación de la corona Boreales (Ripoll, 1977).

Estas representaciones icónicas de la vida diaria vendrían siendo los primeros mapas que el ser humano diseñó y que representan sus áreas de cacería, áreas de recolección, tal vez lugares que representaban una amenaza para ellos, sus límites territoriales o conocidos, fuentes de agua, etc., pero es probable que antes de que el hombre prehistórico descubriera los pigmentos y alguna herramienta que le ayudara a dibujar las paredes de las cuevas o que expeliéndolos con su boca como rociador, descubrir que podían dejar su mano delineada en la roca. Es probable que los primeros mapas se hicieron con una simple rama seca del suelo realizando algunos trazos como cuando dibujamos en la arena. Antes de hacer las primeras líneas en la tierra, el primer mapa debió de haber existido en la mente de estos hombres para ubicar y recordar en dónde encontraban algo que les ayudara a sobrevivir o que amenazara su existencia, aunque no fueran pensamientos racionales sino puro instinto; de otra forma la especie humana se habría extinguido.

Al parecer el dibujo más antiguo que se asemeja a un mapa data del 6500 a.C. tallado en las cuatro paredes de una habitación que es parte de un asentamiento neolítico conocido como "Çatal Höyük" que se encuentra al sur de la ciudad de Ankara en Anatolia, hoy Turquía. De estas cuatro paredes que se cree que representaban el mapa completo, sólo sobrevive una que muestra parte de los asentamientos humanos de la época y un volcán de dos picos que coincide con el llamado "Hasan Dagi" (Brock y Fairall, 1999).

Existen otras evidencias de representaciones espaciales que también datan de más de 3000 a.C. con la categoría de mapas en diferentes versiones que demuestran que este medio de "expresión", por llamarlo de algún modo, es anterior a la escritura, es decir, a la relación de sonidos con gráficos. Según Brock (1999) existen 57 mapas descubiertos en Europa y Oriente Medio que contienen algún tipo de cartografía primitiva. Es probable que alrededor de estas fechas tenga su origen la geodesia, suponiendo que tenía que existir de algún modo un sentido de orientación, y si se atribuye esta hipótesis a la existencia de menhires que presuntamente medían sombras y calculaban el tiempo, se puede decir que eran puntos de partida para comenzar a medir.

Para el 1600 a.C. la civilización Minoica en Creta, Grecia, realizó un mural llamado "La Casa del Almirante" que se caracteriza por ser una representación oblicua de un poblado asentado a la orilla del mar. En el año 1500 a.C. encon-

tramos el mapa de Bedolina, en la región Valcamónica al norte de Italia, éste fue hecho a la intemperie sobre roca glaciar por un pueblo del cual no existen restos arqueológicos, siendo esta representación el único legado de que existieron (Barber, 2005). Alrededor de este mismo año aparece el mapa de Nippur, Babilonia, que se caracteriza por tener nociones matemáticas como círculos divididos en 360 grados y por incorporar conceptos como orientación y escala; conocimientos que desarrolló hasta cientos de años después Pitágoras (*Ibid.*).

Los primeros mapas "transportables" conocidos quizás fueron hechos en pergaminos para mostrar las minas de oro de Coptes durante el periodo de Ramsés II en Egipto (1292-1225 a. C.), o probablemente fueron primero las tablillas de arcilla con escritura cuneiforme de los babilonios que describían el mundo como ellos lo conocían (Bernhardsen, 2002), aunque se sabe que los chinos tenían cartografía desde hace 50 siglos y es posible que fueran los primeros con cartografía que se pudiera llevar y traer en algún tipo de medio.

Los primeros mapamundis que se conocen son de los babilonios en el año 600 a.C. y el de Anaximander de Miletus del año 550 a.C., del cual no existe original sino nada más las descripciones en los libros II y IV de la obra *Historiae* de Herodoto de Halicarnaso que incluyen un mapa del mundo como era concebido (Friendly, 2006). En este segundo libro, de nueve, Herodoto le atribuye a los egipcios el establecimiento de las bases de la geometría y principios geodésicos con los que construyeron sus pirámides, basados en instrumentos similares al *gnomon* para poder medir la longitud de la sombra proyectada por el Sol y orientando sus estructuras hacia la medición más corta que indica el Norte.

Más tarde los griegos fueron perfeccionando sus habilidades geográficas y cartográficas como su medio de expresión, realizando mapas más realistas y utilizando un sistema de coordenadas rectangulares para hacer sus mapas alrededor del 300 a.C. Unos cien años más tarde el matemático, astrónomo y geógrafo griego Eratóstenes de Cirene –quien fuera director de la biblioteca de Alejandría y considerado padre de la geodesia–, establece los principios científicos de la cartografía (Bernhardsen, 2002), haciendo el primer cálculo conocido de la circunferencia de la Tierra en 240 a.C. al comparar la altura del Sol en un mismo día (el solsticio de verano) y en dos ciudades relativamente alejadas (Alejandría y Siena), creando la primera red de meridianos y paralelos de entre otros cálculos como la distancia al Sol y a la Luna. El segundo Platón, como se le conocía a Eratóstenes, es quien bautiza a la Geografía con este nombre por la misma fecha y es quien calcula en 39 690 km la circunferencia de la Tierra; hoy se sabe que tiene 40 008 km de circunferencia. A este respecto no fue el único "geodesta" que midió la Tierra, la más importante y que tendría una especial incidencia en la historia de la huma-

nidad es la de Estrabón de Amasia alrededor del 20 a.C. quien calculó que la Tierra tenía 29 000 km; esta cifra es adoptada más tarde por Ptolomeo para sus cálculos y después es Colón quien los utiliza llegando así a la conclusión de que Asia quedaba a solo 4 800 km, cuando en realidad tiene una distancia de 16 000 km; su suerte fue que hubiese un continente a la mitad.

El imperio romano también tuvo su cuota de cartografía para manejar su imperio y ésta fue utilizada como símbolo de propaganda en monedas en el año 64 (Barber, 2005). Durante este periodo un nombre que no se puede dejar de mencionar es Claudio Ptolomeo, quien utilizó los principios cartográficos de Eratóstenes y los cálculos de Estrabón para recrear la superficie esférica de la Tierra en una superficie plana. Ptolomeo escribe en el año 150 *Geographia*, donde incluye un mapa del mundo conocido en una representación cónica donde los paralelos son círculos con el centro en el Polo Norte, los meridianos son líneas rectas que convergen en el Polo (Joly, 1988), y que se basaba en mapas militares del imperio romano como fuente de información para la geografía (Barber, 2005). Fue también el primero en hablar de longitudes geográficas en términos semejantes a los actuales siendo su contribución, la última y más sobresaliente del mundo antiguo.

Es posible que uno de los mapas más detallados hechos hasta el momento fuera el *Forma Urbis Romae* en el año 203, donde una escala de trabajo consistente en 1:240 muestra no sólo la ciudad completa de Roma, manzana por manzana, sino que también cuenta con detalles como escaleras, habitaciones, fuentes, columnas, etc. (*Ibid.*). En el año 425 el filósofo Ambrosius Macrobius (Thrower, 2002) hace un mapamundi de carácter científico mostrando cinco zonas: dos polares, dos templadas y una ecuatorial. Este mapa del mundo carecía de detalles geográficos y se basaba en las hipótesis del griego Crates de Mallos (170 a.C.) quien suponía que existían cuatro grandes masas continentales en la Tierra, cada una con una zona habitable y separadas por grandes océanos (Barber, 2005).

En el periodo medieval o mejor llamado "el oscurantismo", todo estudio técnico o científico queda estancado, y no sólo eso, se sufre un retroceso cuando la concepción de la Tierra vuelve a ser plana, sin límites, en donde el centro de todo es el hombre poniendo a Tierra Santa (Capel y Arteaga, 1984) en el centro de una pobre cartografía que se realizaba en este periodo comprendido entre la caída del imperio romano y el siglo XV, donde se puede apreciar en la parte superior de los mapas las representaciones divinas, tomando como modelo los trabajos de Ptolomeo.

Mientras Europa estaba en este periodo, los trabajos cartográficos y geodésicos de los griegos, con sus cuadrículas y mediciones de la circunferencia terrestre,

fueron continuados por los árabes del califato de Bagdad, entre el siglo VIII y IX, quienes introdujeron nuevas metodologías en sus observaciones y realizaron varias mediciones de un grado de meridiano entre los ríos Tigres y Éufrates para contrastar los cálculos efectuados por los griegos. Al-Biruni, matemático y astrónomo del mundo islámico, a principios de este siglo XI y a su corta edad, fue capaz de calcular la latitud de Kath, y ya había escrito varias obras cortas sobre cartografía que incluían un método para la proyección de un hemisferio en un plano. Sus escritos incluían temas como cronología, los astrolabios, el sistema decimal, entre otros. También calculó el radio de la esfera terrestre con un error inferior al 1% de su valor medio aceptado en ese entonces y que el mundo occidental no llegó a tener un resultado equivalente hasta que varios siglos después se repitieran los cálculos en Francia, cuna de la geodesia moderna. El mundo árabe siempre se caracterizó por sus adelantos en matemáticas, astronomía y navegación, difundiéndose así desde el siglo XII las cartas de "derrota" o mapas portulanos gracias a los intercambios de carácter comercial con Europa. Resaltó el trabajo de Al-Idrisi, quien hacia el 1159 se destacara por su cartografía compuesta de información generada en Europa el mundo islámico (Turco, 1968). Estos mapas se distinguieron por registrar islas y delinear la costa con fines de navegación, caracterizándose por presentar una escala gráfica que daba una idea de la magnitud de las distancias, así como una rosa de los vientos que indicaba la orientación del mapa; éstos fueron elaborados en términos generales con un cierto lujo artístico (Barber, 2005; Joly, 1988).

Durante el renacimiento, periodo que inicia en Italia en el siglo XIV y se difunde por Europa durante los siglos XV y XVI, la cartografía se ve beneficiada por la introducción de la imprenta (Joly, 1988) y por el desarrollo de la tipografía por Johannes Gutemberg alrededor de 1455. En 1492 Cristóbal Colón descubre un nuevo territorio y la cartografía adquiere un auge sin precedentes y un nuevo sentido convirtiéndose en un arte, donde en ocasiones era más importante que las letras del mapa fueran itálicas y en oro que la geografía de un lugar. Se comprueba una vez más que la Tierra es redonda y renacen los conocimientos de los antiguos griegos como el uso de las proyecciones y los sistemas de medición (*Ibid.*). Cabe mencionar que Colón no determinaba las latitudes en alta mar, sino que navegaba por estima, es decir, apreciando según su parecer la distancia recorrida en veinticuatro horas y registrando el rumbo según el compás náutico. Utilizó el cuadrante marino y la plomada para observar la altura de la estrella polar, pero tan solo como una comprobación de la estima, haciendo siempre referencia a los cálculos de Ptolomeo. A finales del siglo XV varios pensantes de la época, como Leonardo da Vinci, tenían sus propios métodos para determinar el

radio de la Tierra, en este caso similar al de Eratóstenes En esta época también a de citarse a Carlos V –por su relación con la geodesia histórica– quien encargó los primeros mapas de los Países Bajos al cartógrafo y topógrafo flamenco Jacob van Deventer, quien entonces empleó por primera vez el novedoso método de la triangulación, que al parecer había sido ideado conjuntamente por él y su discípulo Gemma Frisius.

El descubrimiento de un nuevo continente trajo aciertos y desaciertos que hasta nuestros días se conservan, como el del geógrafo alemán Martín Waldseemüller en 1507, cuando por error al hacer un mapa del nuevo mundo y un pequeño globo terráqueo acompañados de un tratado geográfico llamado *Introducción a la Cosmografía*, relata los viajes del navegante italiano Américo Vespucio, apareciendo éste como el descubridor del Nuevo Mundo. Surge así el nombre de América por primera vez en las tres obras (Barber, 2005). Años más tarde, en 1516, Waldseemüller trata de enmendar su error pero sólo a un pequeño territorio logra cambiarle el nombre en honor a Cristóbal Colón y fue Colombia.

Así como el renacimiento se inicia en Italia, la cartografía no fue la excepción, la escuela italiana iniciada unos años antes del descubrimiento de América se considera la primera dentro de este nuevo pensamiento al igual que sus navegantes. Los renacentistas se enfrentaron al problema de representar objetos en tercera dimensión en sus pinturas y dibujos al igual que los cartógrafos que representaron a la Tierra en un mapa; la búsqueda de este refinamiento llevó a la modificación y perfeccionamiento de las técnicas griegas que, aunadas a los avances técnicos y científicos (Joly, 1988) de la época, llevaron a geógrafos holandeses, como Abraham Ortelius en 1570 (Capel y Arteaga, 1984), a crear el primer atlas moderno llamado *Theatrum Orbis Terrarum*, y a Gerardus Mercator, en 1585, a desarrollar una proyección, por la cual es conocido, en la que las líneas de longitud eran paralelas a la carta, lo que permitió la navegación al poder marcar los rumbos en líneas rectas. En 1595 (*Ibid.*) publica su atlas iniciándose la escuela holandesa, la cual duraría todo el siglo XVII. Fue en este siglo que el holandés Willebrordus Snellius le diera un gran impulso a la cartografía con la triangulación para el levantamiento de grandes extensiones en 1617, mediante la geodesia redefinida como la ciencia y tecnología de la medición y de la determinación de la figura terrestre. El origen de la geodesia se remonta al de la geometría con los griegos, Herón de Alejandria inventó el primer instrumento geodésico de precisión llamado dioptra. La primera medida geodésica de precisión fue la que realizó el abad francés Jean Picard entre las ciudades de Amiens y Malvoisine, a lo largo de 1668 y 1670, cálculos que se presume utilizó Isaac Newton para confirmar su hipótesis de la gravitación universal. Siguiendo esta línea imaginaria al norte de

Amiens y al sur de Malvoisine, Giovanni Cassini hizo la primera medida de la variabilidad de la curvatura terrestre conociéndosele como el meridiano de París.

Al movimiento intelectual nacido en Francia en el siglo XVIII se le conoce como la Ilustración o el Siglo de las Luces, una época de progreso de conocimientos racionales y de perfeccionamiento de las técnicas y de la ciencia (Capel y Arteaga, 1984), y es aquí donde la escuela francesa toma la batuta de la historia junto con la escuela inglesa. La cartografía de este periodo busca la precisión y deja de lado la estética, caracterizándose por levantamientos geodésicos con un protocolo metodológico de triangulación con el cual se determinaban geométricamente las posiciones de latitud y longitud, y calculando las coordenadas astronómicas de puntos acotados, meta cinética que no se hubiera podido llevar a cabo si no fuera por el siguiente relato.

La intensa búsqueda de una solución al problema de calcular la longitud era comparable al secreto del movimiento perpetuo o la fórmula para convertir el plomo en oro, pero la invención de un reloj confiable de poco volumen daría la respuesta al tamaño de un meridiano. John Harrison, un relojero británico inventó un reloj entre 1735 y 1739 que llevaba la hora exacta desde el puerto de origen hasta cualquier parte de la Tierra, y con este avance la ilustración, desde el punto de vista geodésico, debe identificarse como la era del elipsoide. Las continuas discusiones sobre la forma de la Tierra hicieron que la Academia de Ciencias de París organizara expediciones a Quito (virreinato del Perú) y a Laponia en Escandinavia para la medición de un grado de meridiano con la ayuda de la hora exacta y compárarlas, trabajo que se prolongó de 1736 a 1743. A partir de entonces, con el conocimiento exacto de la forma y magnitud de la Tierra, se podía cartografiar, situando correctamente longitud y latitud, eliminando distorsiones.

Comparando las mediciones de las expediciones se pudo determinar que la Tierra tiene forma de un elipsoide de revolución achatado por los polos, pues las longitudes de los arcos de un grado de meridiano van decreciendo desde el Ecuador hacia los Polos. Los resultados de estas dos expediciones científicas tan fundamentales en el desarrollo posterior de la geodesia, marcaron la ciencia de todo el siglo XVIII al hacer prevalecer, finalmente, el modelo newtoniano (elipsoide oblato), aunque todavía no se conociera muy bien su achatamiento, frente al modelo de Tierra cartesiano (elipsoide prolato). En los años siguientes la base teórica de la geodesia fue perfeccionada, en primer lugar por Johann Heinrich Lambert con conocimiento matemático del achatamiento de la Tierra a través de la precesión y nutación, así como por Pierre Simon Laplace (Almazán *et al.*, 2006).

Otro avance científico que marca este periodo es el establecimiento del sistema métrico decimal como medida universal para cálculos subsecuentes, ya que antes de que el metro patrón fuera la base de las mediciones se tenían diferentes sistemas, como la toesa y la vara castellana, entre otros.

El conocimiento científico y la exploración de los nuevos mundos no se centrarían exclusivamente en su figura cartográfica y una descripción somera de sus existencias naturales y humanas como en general había sucedido durante el renacimiento, sino en la sistematización de inventarios, clasificación e interpretación científica de los datos aportados por el descubrimiento, situación que involucraría definitivamente a la ciencia de la observación y la experimentación en la exploración y explotación económica de la diversidad del mundo. Los viajes de exploración alrededor del mundo ampliaron la superficie conocida de la Tierra, el carácter distintivo de estas nuevas empresas exploratorias fue la interrelación entre propósitos imperialistas y científicos, y eso llevó a que el dominio de la naturaleza y el dominio territorial se unieran en la política colonial del siglo XVIII, transformando a los sistemas de registro de la información (verbales, estadísticas y gráficas) en herramientas de recolección, inventario y representación (Berthon y Robinson, 1990).

Los métodos del siglo XVIII: triangulación, astronomía esférica, gravimetría y medida del tiempo, se refinan con el desarrollo del cálculo de probabilidades de Laplace en 1818; el método de alturas iguales para determinar simultáneamente la longitud y la latitud y del método de los mínimos cuadrados desarrollados por Carl Friedrich Gauss en 1808 y 1809, respectivamente, comenzando a configurarse las redes geodésicas de acuerdo con el criterio de las cadenas principales a lo largo de meridianos y paralelos con la finalidad de obtener el elipsoide que tiene la mejor aproximación con la forma de la Tierra, y de entre los que se destaca el elipsoide de Clarke de 1866.

En el siglo XIX la geodesia se convierte en el soporte de las representaciones cartográficas y aparece por primera vez en 1873 la palabra "geoide" para designar la figura física de la Tierra y es en este periodo cuando comenzaron a surgir centros cartográficos en todas partes del mundo. También tiene su origen el análisis del espacio y el tiempo al cartografiarse un gran número de características poblacionales, tales como la pobreza, el crimen, las condiciones sanitarias y las enfermedades, y en muchos casos se constató que la información así representada ayudaba en gran manera a la comprensión de estos fenómenos, como el trabajo de John Snow, mencionado al principio de este capítulo. Del mismo modo, la cartografía temática se abre camino con personajes como Henry Drury Harness, quien en 1837 empleó técnicas tales como el mapa dasimétrico y los símbolos

proporcionales, así como el danés Nils Frederik Ravn quien en 1857 utilizó isopletas para representar fenómenos sociales y culturales. Otra innovación que tuvo un uso creciente fue la del bloque diagrama, muy usado por los geomorfólogos y de forma destacada por el geógrafo William Morris Davis (Trower, 2002).

A finales de siglo se empezó a profundizar en el campo de la gravimetría, técnica que permite conocer la diferencia de gravedad que existe en distintos puntos sobre la Tierra. Desde que Newton descubre en 1685 que todos los objetos del universo se atraen, se comenzó a investigar el efecto de la gravedad en la superficie terrestre, dándose las primeras mediciones gravimétricas, en 1864, con cierta precisión en Suiza por Phillippe Plantamour, esto con la finalidad de determinar, con la mejor precisión, el valor de la gravedad "g" que se tomó como medio para recalcular el achatamiento de la Tierra y continuar con el refinamiento de los elipsoides (Almazán *et al*., 2006).

El geógrafo alemán Carl Ritter, en 1820, se interesó en la educación geográfica y publicó algunos mapas con este fin. Es conocido por la hipsometría que ha perdurado hasta hoy como un estándar en cartografía. Alexander Von Humboldt representó buena parte de sus aportaciones geográficas mediante mapas, mejorando y expandiendo el lenguaje cartográfico sentando las bases para la biogeografía. Escribió una obra en cinco tomos, *Kosmos* (*El cosmos*, 1849-1858), en la que expone no sólo su amplio conocimiento sino la mayor parte del conocimiento geográfico y geológico de la época.

La revolución industrial trajo grandes avances en todos los rubros del conocimiento, ya sea de manera directa o indirecta, como ejemplo de esto se puede mencionar el ferrocarril, que obligó al establecimiento de zonas horarias que se popularizaron rápidamente gracias a la cartografía. El incremento en la navegación en este siglo también obligó a un mayor refinamiento en la cartografía náutica, donde cabe destacar el trabajo de Matthew. Fontaine Maury, quien fuera colaborador de Humboldt, en 1853 fue uno de los fundadores de la oceanografía sistemática y creador de cartas donde venían expresados los mejores trayectos en función de vientos y corrientes.

El siglo XX es conocido como la era de las comunicaciones; el teléfono, el radio, el automóvil y el avión, que revolucionan el mundo entero y lo acortan en todos los sentidos, y si a esto le sumamos la invención de las computadoras, satélites de telecomunicación, la fibra óptica, etc., se tiene como resultado un avance técnico y científico sin precedentes donde el desarrollo que presenta la geografía, la cartografía y la geodesia es exponencial. A mediados de este siglo nacen los SIG; aparece la geodesia espacial, que utiliza en gran medida los fundamentos matemáticos que ya estaban establecidos para la geodesia tradicional, y que se basa en

observaciones de puntos fuera de la superficie de la Tierra mediante señales de radio.

En 1957 el lanzamiento del Sputnik-1 marca el inicio de la era espacial con los satélites artificiales, y uno de los campos que se ha beneficiado con el desarrollo de esta tecnología es el de las Ciencias de la Tierra. Dentro de estos sistemas geodésicos encontramos el sistema TRANSIT en los años ochenta que evoluciona al NAVSTAR de origen norteamericano, mejor conocido como GPS operativo desde 1992, y el GLONASS de fabricación rusa en operación desde 1995, ambos desarrollados por instancias militares y que utilizan un sistema de referencia inercial cartesiano que en el caso de emplear la constelación NAVSTAR-GPS corresponde al sistema WGS-84, y en el caso de usar la constelación GLONASS corresponde al sistema PZ-90. Con estos sistemas se le ha dado continuidad al refinamiento de las técnicas para obtener una mejor representación física de la Tierra, ya que las mediciones obtenidas de altimetría, a partir de los satélites, sumadas a los datos gravimétricos obtenidos en la superficie, son las observaciones más innovadoras desde el punto de vista global. Un proyecto que promete mejorar aún más estos cálculos es el sistema Galileo, que es la iniciativa de la unión europea para desarrollar un sistema global de navegación por satélite de carácter civil, que proporcione independencia respecto a los sistemas actuales norteamericano y ruso, y que se espera esté en operación en el 2010.

El Capítulo Mexicano

La cartografía es una forma de pensar en cosas abstractas de manera grafica y práctica. Cuando Hernán Cortés es cuestionado de cómo es el terreno en la Nueva España, simplemente arrugó una hoja de papel y la puso sobre la mesa diciendo "estos son los nuevos territorios" (tMCG, 1993), siendo esta una forma de hacer un "mapa" que en su momento cumplió con la función de dar a entender que el terreno mexicano no era algo sencillo.

México-Tenochtitlán cobra realidad en el siglo XVI para los europeos a través de las descripciones que hacen sus cronistas como Bernal Díaz del Castillo y su conquistador Hernán Cortés. El siglo XVI no sólo se caracterizó por el descubrimiento de nuevas tierras, ya que el renacimiento ocupó un lugar importante en la historia, y la mezcla de estos dos hechos dieron como resultado una cartografía única para el nuevo mundo donde se puede apreciar la técnica europea en el trazo de las formas con descripciones en letras itálicas junto a los glifos que eran los

elementos pictográficos con los que se representaban los nombres o toponimias de los indígenas del nuevo mundo (Mendoza *et al.*, 2000).

El México precolombino tuvo su propia cartografía y de acuerdo con los relatos de los conquistadores, era muy basta y comprensible, pero de los códices prehispánicos existen en la actualidad muy pocos, debido a que desde la conquista fueron destruidos en forma generalizada; primero con la toma de los edificios en donde se guardaban o *amoxcallis* y después en "autos de fe" que organizaba la iglesia para aniquilar lo que consideraba como "obras del demonio" (Galarza, 1997). Durante la colonia la destrucción se volvió sistemática, por una parte, debido a denuncias de los propios indígenas convertidos al catolicismo y por la otra a petición de las autoridades religiosas y civiles, pero no sin antes quedar indicios de esta cartografía en diferentes documentos como el Códice *Aubin*, donde encontramos la representación de *Aztlan* en medio de una laguna, lugar donde los antiguos textos sitúan el origen de los mexicas, así como la fundación de Tenochtitlán valiéndose de elementos pictográficos y textos náhuatl, hecho que también aparece en el Códice Mendocino. El Códice *Mexicanus* que ilustra el momento en el que los mexicas abandonan *Aztlan* guiados por Huitzilopochtli, el Códice *Azcatitlan* que muestra el peregrinar de los mexicas y las batallas que sostienen con los tepanecas en el lago, el Códice *Xolotl* con representaciones que muestran el uso que se le daba a la tierra, Códice Cholula, el Mapa Sigüenza, los cuatro Mapas de *Cuauhtinchan*, Mapa de Upsala, el Lienzo de *Coixtlahuaca*, Lienzo de *Cuauhquechollan*, por citar algunos (Mendoza *et al.*, 2000; Valle, 1997).

Esta "cartografía" no contaba con ningún tipo de escala que permitiera cuantificar distancias o áreas, y tampoco una proyección que mostrara su ubicación en el espacio, pero cumplía con su función de situar y administrar. Estaba ordenada en dos grandes temas: representaciones de áreas específicas y de rutas. Los relatos de los españoles no eran solamente palabras soberbias destinadas a contar sus propias hazañas, también mostraban una admiración y asombro por lo que sus ojos veían, así como las representaciones del territorio y sus rasgos en una cartografía muy incipiente pero capaz de mostrarles la grandeza de los nuevos territorios. Estas representaciones se hacían con signos glíficos que imitaban la realidad que los rodeaba: los ríos eran dos líneas paralelas que se diferenciaban en corrientes principales y arroyos con la presencia o ausencia de unas hojas de palma al interior, respectivamente, encontrando en algunas ocasiones figuras de peces –si la pesca era abundante en esa área–; los cuerpos de agua eran meras siluetas en color azul que representaban un área que nada tenía que ver con la realidad, en ocasiones con líneas verdes a su alrededor mostraban algún tipo de vegetación; los manantiales eran áreas amarillas con azul en su interior, usualmente relacionados

con los cerros y montañas que creían eran grandes contenedores de agua y que se representaban como cántaros. Las localidades eran representadas por cuadros que simbolizaban las ciudadelas y podían contener gráficos en su interior como la representación de una pirámide a la que se llamaba *teocalli* o templo, símbolo que durante la conquista se cambió por una cruz. Los cerros solían adoptar el color verde cuando se encontraban cubiertos de vegetación o amarillo si el suelo era desnudo. Si se trataba de un volcán, se le dibujaban llamas si estaba activo, y si contaba con arenales se le ponían puntos negros al interior, la representación de los caminos u *otli* se hacían con dos líneas paralelas dibujando huellas de pies descalzos en la parte central indicando la dirección, y se cree que cada huella representaba una cierta distancia, poniendo plantas de diferentes formas a los lados de éste para representar donde había magueyes o arboledas.

Esta cartografía la realizaban los dibujantes de la época llamados *tlacuilos* (León-Portilla, 2003), quienes se encargaban de crear los signos y símbolos para representar el medio que los rodeaba. Un buen ejemplo de esta concepción espacial de los indígenas transformado en gráficos era la orientación, las distancias, las proporciones de los objetos, los caminos, etc., que se puede encontrar en el mapa de Tepecuacuilco y los Mapas de I y II del Códice Kingsborough.

El nuevo mundo es descubierto en 1492 y para 1521 México-Tenochtitlán estaba conquistada. Durante estas tres décadas es claro que la cartografía indígena fue ampliamente utilizada por su conquistador Hernán Cortés y sus cronistas, según algunos de sus relatos, desde el Istmo de Tehuantepec hasta lo que hoy se conoce como Honduras. En 1524 se le atribuye a Hernán Cortés el primer mapa con influencia europea llamado *México-Tenochtitlán* por su publicación en una edición de las *Cartas de Relación* enviadas a España donde la ciudad mexica es representada con un cuadrado al centro del mapa, mostrando con esto un rasgo inequívoco de la cartografía indígena, y de donde parten las calzadas de *Tepeyacac* al norte; de *Coyohuacan* o *Ixtapalapan* al sur; la de *Tacuba* junto con el acueducto de C*hapultepec* al oeste, y el albarradón de *Netzahualcóyotl* al este, e incluye la costa del Golfo de México, que para la fecha no se había explorado, por lo que se presume que fue tomada de algún códice.

En 1579 es publicado el mapa *Hispania Novae* como parte del atlas *Theatrum Orbis Terrarum* de A. Ortelius donde por primera vez aparecen detalles del interior de la Nueva España, ya que hasta ahora sólo se habían registrado los litorales, e incluía los primeros toponímicos novohispanos (Van den Broecke, 1996). Y en 1680 aparece la primera carta general de la Nueva España de un mexicano, Carlos de Sigüenza y Góngora. Según se sabe, ésta nunca fue impresa pero fue la

base para toda la producción cartográfica del siglo XVIII, además de que le valió su ingreso gracias al rey Luis XVI, a la Real Academia de Ciencias de París.

Una fuente de información para la cartografía colonial era proporcionada por la iglesia para definir jurisdicciones eclesiásticas del clero secular y regular encontrando en estos antiguos pueblos indígenas, lenguas y grupos étnicos. Un exponente de esta cartografía es el jesuita Francisco Eusebio Kino quien contribuye con el noroeste de la Nueva España y quien desmiente que Baja California era una isla al costear la península en 1700 (Polzer, 1987). Un cartógrafo importante para la Nueva España representante de la cartografía barroca novohispana fue Antonio de Villaseñor y Sánchez, quien en 1749 publica un documento llamado el *Theatro Americano* con una carta conocida como *Mapa Geographico de la América Septentrional* y quien también publicara en 1753 el *Mapa de la Muy Noble, Leal e Imperial Ciudad de México*.

La escuela cartográfica neoclásica es encabezada por los ingenieros militares de la Nueva España en 1770 con el coronel Miguel de Santiesteban. Esta cartografía se caracterizó por hacer levantamientos con técnicas topográficas y de agrimensura. En 1772 Joaquín Velázquez de León hace la carta general de la Nueva España que recibe el reconocimiento de Alejandro de Humboldt.

Humboldt llega a la Nueva España en 1803 autorizado por Carlos III para estudiar los recursos naturales, y lo primero que hizo fue una recopilación desde la carta general de Sigüenza y Góngora hasta sus días. Para 1804 Humboldt publica la *Carta General de la Nueva España* y el *Atlas Geográfico y Físico del Reino de la Nueva España*.

En 1824, después de la caída del primer imperio por Agustín de Iturbide, el país se comenzó a llamar Estados Unidos Mexicanos con una constitución donde se establecían 22 estados de los 19 originalmente planteados en 1814 en el Decreto Constitucional para la Libertad de la América Mexicana y tres territorios (Baja California Norte y Sur, y Quintana Roo), los cuales son incorporados a la República hasta la Constitución de 1917. Se estimaba que el país en ese entonces andaba por los cuatro millones de kilómetros cuadrados pero sin el conocimiento completo de gran parte del territorio y sin el correcto establecimiento de sus fronteras.

En 1833 se crea el Instituto Nacional de Geografía y Estadística para realizar una carta general de la República Mexicana con la proyección de Mercator, institución que se convertiría más tarde en la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística (SMGE) pero para este tiempo el esfuerzo terminó sólo con el acopio de la información existente en el país, hasta que en 1839 se crea la Comisión de Estadística Militar por parte del Ministerio de Guerra que también fue creada

con la misma finalidad, dicha carta se terminó en 1850, pero por razones económicas nunca fue impresa.

Sin grandes avances en el conocimiento de la geografía del país, México pierde el territorio de Texas cuando Santa Anna firma su independencia en 1836; en 1848 es invadido por Estados Unidos y vuelve a perder territorio, esta vez la mitad de lo que quedaba con el tratado de Guadalupe-Hidalgo. La cartografía que se utilizó para la nueva división tenía tantos errores que ni siquiera se conocían los propios límites territoriales con exactitud, por lo que cualquier cantidad de problemas se derivaron como los casos del territorio de La Mesilla, frontera que delimitamos en el actual estado de Arizona, Estados Unidos con el Río Gila, y El Chamizal en Chihuahua por las desviaciones del Río Bravo, problema que desde 1866 hasta la mitad del siglo XX persistió. A este respecto, la frontera sur también tiene su cuota de problemas con Guatemala por el territorio del Soconusco y con Honduras Británicas por el territorio de Chan Santa Cruz en la actual Quintana Roo, problema que se resolvió durante el porfiriato en 1893 y 1897, respectivamente. El territorio insular tampoco se quedaba atrás en problemas, las Islas Revillagigedo con los ingleses por el depósito y suministro de carbón, y Cayo Arenas con los americanos por la explotación de guano, ambas recuperadas en 1896, e Isla Clipperton o Isla de la Pasión con los franceses la cual se perdió en 1931.

En 1856 Antonio García Cubas publica el *Atlas Geográfico e Histórico de la República Mexicana* –la mejor obra cartográfica de México– que contaba con dos cartas generales del país y 29 cartas estatales. Esta versión fue mejorada y reeditada en 1863 con el apoyo de Francisco Díaz Covarrubias. Hasta entonces, toda la cartografía producida en México era una obra sólo de carácter físico: describía límites, ubicaba toponimias, trazaba hidrografía, etc., pero en 1864 Manuel Orozco y Berra publica la *Carta Etnográfica de México* que se podría considerar como la primera cartografía temática del país.

En este tiempo, Benito Juárez quien era presidente de México y debido a que los problemas económicos eran tan grandes, se vio obligado en 1862 a decretar que durante dos años se dejaran de pagar las deudas que había con España, Francia e Inglaterra. A raíz de esta situación se da la intervención francesa o segundo imperio, quedando Maximiliano en el poder y, por ende, la cartografía recién creada es usada por los ingenieros militares franceses para su beneficio hasta 1867, año en que Juárez retoma el poder. Antes de ser fusilado Maximiliano se publica la *Carta General del Imperio Mexicano*, la cual estaba basada en el trabajo de García Cubas, por lo que se reeditó con algunas mejoras como *Carta General de la República Mexicana* un año después. Lo aprendido por los franceses sobre el

territorio mexicano por sus propios ingenieros se ve reflejado hasta 1873 cuando publican la *Carte du Mexique*, que a pesar de las adecuaciones, el trabajo de García Cubas seguía presente. Dentro de una relativa calma política los trabajos cartográficos continúan en el país, en este mismo año en que los franceses publican su carta de México, es inaugurada la primera línea férrea, y aparecen las primeras cartas ferroviarias de la Ciudad de México a Veracruz.

En 1877 Porfirio Díaz asume por primera vez el gobierno de la República y las primeras acciones que se tomaron fue la creación de la Comisión Geográfico-Exploradora (CGE) por decreto en el diario oficial de la federación de este mismo año y un Departamento de Geografía en el Ministerio de Fomento a cargo de Manuel Orozco y Berra, quien editara la primera carta etnográfica años atrás. De los trabajos más destacados de dicha comisión son la creación de una *Carta General de la República Mexicana* (otra más) fraccionada en hojas de gran escala, así como la cartografía, también fraccionada de los estados, cartas de población, hidrológica y militar; todo esto en una proyección policónica de 15 por 15 minutos y curvas de nivel cada 50 m.

En 1880 se crea un Departamento de Historia Natural dentro de la CGE que se encarga de colectar y clasificar, animales, plantas y minerales incorporando estos datos en diversas cartas, dando así prestigio a la comisión a nivel internacional con los avances científicos de la época en el país; es el último esfuerzo que realiza la CGE, antes de desaparecer en 1914. Debido al triunfo de la revolución se crea la *Carta General de la República* Mexicana en 204 hojas a escala 1:100 000 de carácter topográfico, que abarca una tercera parte del territorio y está basada en el meridiano de la Ciudad de México que pasa por la torre este de la Catedral de México.

En 1883 se promulga la Ley sobre Deslinde de Terrenos y Colonización creándose empresas privadas para delimitar y fraccionar la tierra, trabajo que se hace con levantamientos topográficos de buena calidad, siendo un gran avance para la cartografía del país pero un gran error histórico por dar pie a la creación de los grandes latifundios finalizando esto en la Revolución Mexicana.

En 1886 se funda la Comisión Geológica y en 1888 se convierte en el Instituto Geológico de México que publica, de 1895 a 1903, un Boletín con este mismo nombre y las primeras cartas geológicas del país que también gozaban de buena reputación en cuanto a precisión se refiere. De entre los trabajos importantes de esta época cabe mencionar el *Atlas Pintoresco e Histórico de los Estados Unidos Mexicanos* de García Cubas en 1885, así como en 1888 el *Diccionario Geográfico, Histórico y Biográfico de México*, en 1892 la *Geografía e Historia del Distrito Federal* y con motivo del 4° centenario del descubrimiento de América la

Carta General del Imperio Mexicano y Demás Naciones Descubiertas y Conquistadas por los Españoles en el siglo XVI, en el Territorio Perteneciente a la hoy República Mexicana.

De los últimos trabajos relevantes de este siglo XIX encontramos que con el propósito de ayudar en estas tareas, en cuanto a precisión de los levantamientos se refiere, en 1898 se crea la Comisión Geodésica Mexicana, y la publicación de una nueva carta General de la República Mexicana escala 1:2 000 000 en 1899, que es una actualización de la publicada por García Cubas en 1863.

México entra al siglo XX con un periodo llamado el porfiriato, en 1884 Porfirio Díaz es reelecto y se queda en el poder hasta 1911 cuando triunfa la Revolución Mexicana y se ve obligado a renunciar. Durante este periodo de alzamientos e indecisión política para México muere Antonio García Cubas en 1912 y es creado el North American Datum (NAD) que fija su origen en Meades Ranch, Kansas (Robinson *et al.*, 1995) el cual adopta México en 1913 y que más tarde en 1927, después de iniciar algunos ajustes de primer-orden en los procesos de triangulación se conocería como NAD27; estos ajustes se terminarían por completo en 1931 (NOAA, 2006).

Para 1915 se funda la Dirección de Estudios Geográficos y Climatológicos (DEGC) con la finalidad de continuar con los trabajos de la Comisión Geodésica Mexicana y de la Comisión Geográfico Exploradora. Cabe mencionar que esta dirección tuvo un carácter civil y no militar como las instituciones del pasado, y destacó por sus trabajos de investigación en geodesia, astronomía, topografía, sismología, gravimetría y otros, lo que resulta en textos para la enseñanza de las Ciencias de la Tierra en universidades. Más tarde para a ser la Dirección de Geografía, Meteorología e Hidrología (DGMH) en 1926.

En 1917 es promulgada la Constitución General de los Estados Unidos Mexicanos donde para el quehacer geográfico destaca el artículo 27, el cual habla del ordenamiento del territorio, su soberanía y bienestar social, modificando todo estilo de vida creado con anterioridad. En este mismo año inicia la enseñanza de la Geografía como una formación técnica en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en la Escuela Nacional de Altos Estudios que hoy en día es la Facultad de Filosofía y Letras, creándose en 1934 la licenciatura en Geografía en esta facultad; años más tarde en 1943 se funda el Instituto de Geografía dentro de la misma Universidad.

En 1934 es elegido presidente Lázaro Cárdenas del Río quien hiciera valer el artículo 27 en 1937 con la expropiación ferrocarrilera y en 1938 con la expropiación petrolera, así como los levantamientos catastrales del país mediante el Departamento Agrario creado el año de su elección. Todas estas acciones tuvieron

consecuencias de gran trascendencia y fueron viables gracias a la fortaleza en materia geográfica con la que contaba el país, en 1936 se funda el Instituto Politécnico Nacional (IPN), en 1938 se crea Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Comisión Geográfica Militar (CGM) con miras al esfuerzo bélico que se gestaba en Europa, en 1939 estalla la II Guerra Mundial y se crea el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), instituciones que sin el desarrollo que tenía el país en geografía, cartografía, y geodesia no hubieran prosperado como lo hicieron.

México se mantiene al margen de la II-GM hasta principios de 1942 con un convenio de colaboración con Estados Unidos para crear cartas orientadas a la defensa de ambas naciones, mediante fotografías aéreas, empleando para ello un sistema llamado trimetrogón. Para 1944 las instituciones mexicanas que realizan cartografía como la CGM incluyen el uso de la fotogrametría aérea en los métodos tradicionales (geodésicos y topográficos), y surgen trabajos como la *Carta General de los Estados Unidos Mexicanos* a escala 1:100 000, utilizando por primera vez la Universal Transversa de Mercator (UTM) creada en Estados Unidos con la finalidad de unificar retículas en los países aliados.

La II-GM resulta en un parteaguas en todos los sentidos y ámbitos del conocimiento humano, y México no es la excepción. Geográfica y cartográficamente nuestro país deja atrás el enfoque descriptivo e histórico donde el propósito era el conocimiento de la geografía nacional y sus características, y comienza a asimilar las tendencias y tecnologías que se van dando en otros países y busca nuevas opciones para llevar a cabo sus estudios viéndose influenciado por las nuevas prácticas cuantitativas, haciendo de la geografía y la cartografía disciplinas más científicas con la generación de modelos, adelantos en las concepciones de espacio y tiempo, y los avances tecnológicos para la obtención y procesamiento de datos, dando por resultado una cartografía de carácter informativa que sirve para caracterizar el territorio diversificando la información e incorporando aspectos sociales y económicos que conducen a la formación de esquemas conceptuales y de integración vinculados con procesos estadísticos orientados a la difusión.

Esta apertura al intercambio de conocimientos crea en nuestro país una multiplicidad de usos para la información geográfica que se enfocan en la planeación y toma de decisiones hacia la industrialización e infraestructura, tecnificación de actividades agropecuarias y docencia e investigación.

En 1945, mientras nacía la primera computadora basada en componentes electromecánicos y bulbos, en México se crea el Comité Coordinador para el Levantamiento de la 'Carta de la República Mexicana' escala 1:500 000, conformado por instituciones académicas y secretarías de gobierno. Para este trabajo se utilizan los datos fotogramétricos de la fuerza aérea de Estados Unidos, lo cual

no es muy aceptado por diferentes instancias, por lo que en 1956 se crea la Comisión Intersecretarial Coordinadora del Levantamiento de la 'Carta Geográfica de la República Mexicana' que sobrevuela todo el país para obtener información de primera mano con el apoyo de la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), dando por resultado las 47 hojas que la conforman en 1958 en una proyección UTM. En este mismo año la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) elabora la *Carta Nacional de Regiones Hidrológicas* y en el transcurso de los años sesenta publica la *Carta de División Hidrológica de la República Mexicana* y el *Inventario de Aprovechamientos Superficiales y Subterráneos para Riego*. Para la década de los setenta son generados diferentes atlas temáticos para la planeación y aprovechamiento de los recursos hidrológicos del país.

Las diferentes instancias de gobierno como la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas (SCOP) gozaban de un prestigio cartográfico desde los años cuarenta a través de la publicación de numerosas cartas y atlas en los que se empleó el uso de los métodos tradicionales. Con la incorporación de la fotografía aérea y sus técnicas de restitución incrementan su producción creando mosaicos de áreas del país que se tenían poco estudiadas. La SCOP, que en 1959 se convierte en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en funciones hasta nuestros días, tiene a su cargo la generación de la cartografía necesaria para vías de comunicación terrestre, aérea, marítima y telecomunicaciones en general. Este mismo año México amplía su zona económica exclusiva en 12 millas marinas, la cual se tenía incluida desde 1960 únicamente como plataforma continental, mientras que en Estados Unidos aparece el circuito integrado desplazando el transistor de 1947 y Waldo Tobler desarrolla un modelo llamado MIMO (map in - map out) que es el precursor del sistema de geocodificación, captura y análisis de datos para un SIG (CASA, 2000).

En 1963 Roger Tomlinson desarrolla el primer SIG en Canadá, dos años más tarde en 1965 geógrafos y técnicos de la Universidad de Harvard desarrollan el programa *Synagraphic Mapping Technique* (SYMAP) que permite imprimir mapas mediante combinaciones alfanuméricas (*Ibid.*). Para 1967 se desarrolla el *Dual Independent Map Encoding* (DIME) como preparación para la automatización del censo de población de 1970 en Estados Unidos, así como el programa "Automatic Mapping System" (AUTOMAP) desarrollado por la CIA con capacidad de producir puntos y líneas (*Ibid.*). En 1968 se crea la Comisión de Estudios del Territorio Nacional y Planeación (CETENAP) con el fin de hacer la cartografía topográfica y temática del país a escala 1:50 000, utilizando lo último en tecnología y metodologías existentes, e inician los levantamientos geodésicos de posicionamiento vertical y horizontal formando líneas de nivelación y poligonales de primero y

segundo orden referidas al nivel medio del mar ligadas a arcos de triangulación y trilateración destinados a construir la red geodesia nacional (Onchi y Montalvo, 2002), mientras que en el país vecino del norte surge el primer procesador vectorial. Dos años después, en 1970, se desarrolla "CALFORM" programa que permite imprimir cartografía de buena calidad, y la CETENAP pasa a ser la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) y en conjunto con la UNAM se publica la Carta de Climas a escala 1:500 000. En 1971 se publica la primera carta topográfica 1:50 000 hoja Tanque de Dolores, S. L. P. (la última se publica en 1988, hoja "San José del Progreso", Oaxaca), e inician los levantamientos gravimétricos regionales que se ligan a la Red Internacional de Estandarización de la Gravedad IGSN (por sus siglas en inglés; *Ibid.*) y en Estados Unidos nace el primer microprocesador. Para 1976 se amplía la zona económica exclusiva a 200 millas marinas y en conjunto con la Secretaría de Marina y la de Relaciones Exteriores se genera la cartografía correspondiente y se crean las reformas pertinentes al artículo 27 constitucional. Para estas fechas el primer satélite de observación terrestre LandSat está en órbita (lanzado en 1972) y la CETENAL comienza a darle uso a las imágenes satelitales de manera analógica con el fin de generar cartografía temática de los recursos naturales del país.

En 1977 se desarrolla el programa ODYSSEY que se caracteriza por su estructura de datos espaciales vectoriales (uso de topología heredado del programa POLYVRT) con un sistema de digitalización y base de datos capaz de crear de forma interactiva e imprimir mapas. En 1980 la CETENAL pasa a ser la Dirección General de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL) y en colaboración con el Centro Científico de IBM de México y con un software propio llamado Sistema Personal Interactivo en Percepción Remota (SPIPR), –desarrollado en aquella dependencia– se les comienza a dar a las imágenes de satélite un tratamiento digital. En 1982 es renombrada como la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (DIGETENAL) con la adquisición de equipo de cómputo para la Dirección General de Geografía (DGG), con el fin de almacenar y manejar un banco de datos con información geográfica; es el primer intento de manejar grandes volúmenes de información espacial en formato digital que resultó en un mejor control y mantenimiento de la información (*Ibid.*), dando inicio al procesamiento digital de la información geográfica en nuestro país. DIGETENAL se transforma en 1983 como el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Para entonces los satélites LandSat 4 y 5 están en órbita con resoluciones de hasta 20 m y sale al mercado Arc/INFO por la compañía Environmental Systems Research Institute (ESRI), fundada desde 1969 (ESRI, 2007).

Esta nueva forma de hacer geografía asistida por computadora e incorporar elementos de análisis espacial y estadístico poco a poco es adoptada por todas y cada una de las instancias de gobierno y organismos privados que ven en ello una forma de inventariar y administrar información, que de otra manera sería casi imposible de manejar en nuestros días. Continuar con esta historia de principios de los años ochenta al día de hoy equivaldría a otro capítulo, ya que la diversificación del SIG se da de una forma acelerada con los primeros sistemas comerciales y luego con los llamados "software libre", pero tal vez sería más interesante incorporar a este capítulo la historia del análisis espacial y los antecedentes del ordenamiento territorial en México, ya que desde 1981 están disponibles las Cartas de Ordenamiento del Territorio por parte de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP) sobre imágenes de satélite con propuestas de planes de desarrollo urbano, por mencionar un ejemplo, cuya idea de regionalización viene desde la independencia con Orozco y Berra. En 1846 se crea la Dirección General de Colonización e Industria que en 1853 se transformaría en la Secretaría de Fomento y, según algunos autores desde la colonia, –o desde los códices prehispánicos– existe este concepto.

Comentarios finales

Durante esta breve revisión del origen de los SIG se ha visto que todas o casi todas las herramientas y métodos usados en geografía y cartografía, tanto para generarla como para hacer análisis, se realizaba a mano desde las primeras civilizaciones y poco a poco fueron perfeccionándolas con diferentes instrumentos que de igual forma eran operados a mano hasta que empezaron a automatizarse, primero con calculadoras mecánicas y después con las computadoras, y con éstas ir creando nuevos métodos y técnicas que casi siempre están basados en los procedimientos originales que les dieron vida.

Mucha de la historia se construye por anécdotas y comentarios que con el paso del tiempo van cobrando sentido y alguien usualmente ajeno a ésta es quien la escribe con su propio punto de vista y, en otras, la fuente original es quien documenta los sucesos pero no es el caso de la historia cartográfica y de muchas otras disciplinas al menos en sus inicios. Aunque existen documentos y mapas que van relatando la historia por sí sola, cabe recordar que no todo el viejo mundo era letrado, las habilidades de leer y escribir eran de unos cuantos y los interesados en ciencia y tecnología eran un número menor; de lo que se descubría o desarrollaba sólo una parte era documentado y publicado, y de ésta un porcen-

taje era censurado o se hacía desaparecer por completo por representar un peligro para la época por lo que hablar de geografía, cartografía y geodesia siempre va a dejar huecos para la discusión.

Hablando de SIG, encontramos que fuera de los primeros esfuerzos que dieron vida a esta herramienta, seguir el rastro detallado de cómo han evolucionado es complicado y nuestro país no es la excepción. Es lógico pensar que en algún momento los SIG llegaron a México, ya qué nosotros no fuimos quienes sentamos las bases ni los desarrollamos, pero establecer en qué instante sucedió esto no está claro; seguramente había noticias de su existencia tal vez sin saber muy bien para qué servían mucho antes de traerlos al país y que de algún modo, sabiéndolos usar, podrían facilitar la existencia.

La historia de estas tres disciplinas en México es complicada ya que siempre estuvo ligada al contexto político reinante y el surgimiento de los SIG es poco claro. En un principio se tenía una cartografía propia, la cual aunque era muy rudimentaria, en comparación con la europea de ese tiempo, una vez conquistados sirvió para facilitarles el trabajo a los españoles. Durante la conquista la "cartografía" precolombina se fusiona con la europea hasta que es substituida por completo para hacer los levantamientos geodésicos, pero no desaparece sin dejar huella. En la actualidad encontramos comunidades indígenas que conservan información relativa a sus territorios originales los cuales reclaman como legítimos, ya que datan desde antes de la conquista. Otro ejemplo lo encontramos en la cartografía actual donde se conservan muchos de los toponímicos originales en ocasiones con sus traducciones o una mezcla de éstos.

Un SIG no sólo permite almacenar y hacer mapas vistosos a través del seguimiento de unas líneas de costa o de la representación con polígonos áreas urbanas y cuerpos de agua unidos con líneas que significan caminos y ríos, esto lo ha hecho la cartografía desde sus inicios hasta nuestros días, ya sea con levantamientos en campo, relatos de terceras personas o por fotografías aéreas, con o sin referencia geográfica, escalas o temporalidad. Anteriormente se compraban en las papelerías mapas de la República Mexicana sin división política, ni ríos, etc., y uno tenía que colorear lo que el maestro dejaba como tarea; hoy día se utiliza un SIG para hacer esa labor, como en el renacimiento, donde importaba más lo llamativo que su contenido espacial.

La cartografía generada con un SIG es una consecuencia, un resultado de un conjunto de operaciones que a su vez pueden ser utilizadas para generar más información por métodos de sobreposición con otros temas y no siempre el resultado final tiene que ser un mapa, en ocasiones una tabla de datos con su gráfica es la mejor opción para expresar un resultado, o la interpretación directa de los

resultados estadísticos es lo que se busca para realizar comparaciones con otras deducciones. Un SIG funciona como una herramienta de análisis estadístico, operaciones matriciales, funciones topológicas y teoría de conjuntos, cálculos en bases de datos, así como operaciones relacionales tanto con datos georreferenciados como alfanuméricos, mediciones en distintos planos, etc., donde el común denominador es su relación espacial y su ubicación en éste, sin importar si los datos son físicos, económicos o sociales.

El uso de un SIG siempre va a depender de la orientación profesional que se tenga y más importante es el grado de conocimiento para manejar las herramientas, y no me refiero al software, ya que muchas veces éste es una caja negra donde no se sabe que ocurre en el interior. Las computadoras no se inventaron para sustituir al papel y al lápiz, se diseñaron para acelerar los procesos, tratando de minimizar errores de dedo para tareas repetitivas y esto siempre ha implicado saber qué es lo que la máquina está haciendo. Para poner a una computadora a hacer una tarea de cálculo repetidamente, primero se hace en un cuaderno para saber cuál es el resultado que esperamos. Hoy en día el saber utilizar un SIG no es ir y picar un botón para que el sistema ejecute un algoritmo, ya que usualmente se desconoce que hace el algoritmo y ni siquiera se sabe si es el adecuado para lo que uno necesita; simplemente es el que viene predefinido. El uso de un SIG implica un diseño conceptual, un diseño lógico y un diseño físico; en otras palabras, si se puede resolver en papel un problema espacial, seremos capaces de resolverlo en una computadora sin importar qué tipo de software se utilice; esto implica saber la teoría primero antes de sentarnos a darle órdenes a una máquina.

Referencias

Almazán, J. L., A. Verdú y M. C. Palomino (2006), "Breve historia de la Geodesia", *Revista Internacional de Ciencias de la Tierra*, España [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla.asp?id_articulo=1348].

Aronoff, S. (1989), *Geographic Information Systems: a management perspective*, WDL Publications, Ottawa, Canadá.

Barber, P. (2005), *The Map Book*, Walker & Company, New York.

Bernhardsen, T. (2002), *Geographic Information Systems: an Introduction*, 3er ed., John Wiley & Sons, Inc.

Berthon, S. and A. Robinson (1990), *The shape of the World: the mapping and discovery of the earth*, Rand McNaly & Co.

Brock, J. and J. Fairall (1999), "The town Pan of catalhoyuk", *Symposium of the International Map Collectors Society*.

Brodrick, A. H. (1981), *La pintura prehistórica*, Colección Breviarios, Fondo de Cultura Económica, México, p. 52.

Burrough. P. A**.** (1986), *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*, Clarendon, Oxford.

Capel, H. y L. Arteaga (1984), *Las Nuevas Geografías*, Aula Abierta Salvat, Barcelona, España.

Carter, J. R. (1989), "On defining the Geographic Information System", in Ripple, W. J. (ed.), *Fundamentals of Geographic Information Systems: a compendium*, ASPRS/ACSM, Falls Church Virginia, pp. 3-7.

Center for Advanced Spatial Analysis (CASA; 2000), *GIS-TimeLine*, University College of London [http://www.casa.ucl.ac.uk/gistimeline/].

Cowen, D. J. (1988), "GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences?", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, no. 54, pp. 1551-4.

DDF (1975), *Memoria de las Obras del Sistema del Drenaje Profundo del Distrito Federal*, tomo II, Departamento del Distrito Federal, México.

DoE (1987), *Handling Geographic Information*, Department of the Environment, HMSO, London.

Devine, H, A. and R. C. Field (1986), "The Gist of GIS", *Journal of Forestry*, August, pp. 17-22.

Dueker K. J. (1979), "Land resource information systems: a review of fifteen years experience", *Geo-processing*, no. 1, pp. 105-28.

ESRI (2007), *Company History*, Environmental Systems Research Institute [http://www.esri.com/company/about/history.html].

Fotheringham, A. S., C. Brunsdon and M. Charlton (2000), "Quantitative Geography", *Perspectives on Spatial Data Analysis*.

Friendly, M. (2006), *Milestones in the History of Thematic Cartography, Statistical Graphics, and Data Visualization*.

Galarza, J. (1997), "Los Códices Prehispánicos", *Arqueología Mexicana*, Revista Bimestral, vol. IV. núm. 23, pp. 6-15.

Harley, B. and D. Woodward (1987), *The History of Cartography*, University of Chicago Press.

INEGI, *La Cartografía en México* [http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/prodyserv/marcoteo/carmex/carmex.cfm?c=236], *International Journal of Geographical Information Systems*, 3(3).

Jensen, J. R. (2000), *Remote Sensing of the Environment: an Earth Resource Perspective*. Prentice Hall, Inc.

Joly, F. (1988), *La Cartografia*, Oikos-Tau.

Kent, A. and C. M. Hall (1998), "Geographic Information Systems", *Encyclopedia of Library and Information Science*, vol. 63 (26), p. 101.

Koshkariov, A. V., V. S. Tikunov and A. V. Trofimov (1989), The Current state and de main trends in the development of geographical information systems in the USSR: pp. 257-72.

León-Portilla, M. (2003), *Códices: Los antiguos libros del Nuevo mundo*, Aguilar, México.

Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire and D. W. Rhind (eds.; 1999), *Geographical Information Systems, Principles, Techniques, Applications and Management*, vol. 1, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., London.

Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire and D. W. Rhind (2001), *Geographic Information Systems and Science*, John Wiley & Sons, Inc., London.

Longley, P. A. and M. Batty (eds.; 2003), *Advanced Spatial Analysis: The CASA Book of GIS*, ESRI Press.

Martínez, J. L. (1972), *Nezahualcoyotl, Vida y Obra*, Fondo de Cultura Económica, México.

Mendoza Vargas, H., M. Antochiw, R. B. Craib, P. Rebert, V. M. Ruiz Naufal y G. Vargas Martínez (2000), *México a través de los Mapas*, Colec. Temas Selectos de Geografía de México (I.1.2), Instituto de Geografía, UNAM y Plaza y Valdés, México.

NOAA (2006), *Geodetic Surveys in the United States, The Beginning and the Next One Hundred Years*, by Dracup, J. F., National Oceanic & Atmospheric Administration, U.S. Horizontal Datums [http://www.history.noaa.gov/stories_tales/geodetic5.html].

Onchi Zalapa, H. y B. Montalvo Melo (2002), "La Base de Datos Geodésicos del INEGI", *Revista de Información y Análisis: Datos, Hechos y Lugares*, núm. 17, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.

Ozemoy, V. M., D. R. Smith and A. Sicherman (1981), "Evaluating computerized geographic information systems using decision analysis", *Interface* 11, pp. 92-8.

Parker, H. D. (1988), "The unique qualities of Geographic Information System: a commentary", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54(11), pp. 1547-49.

Polzer, S. J. and W. Charles (1987), *Guía del Padre Kino: sus misiones y sus monumentos*, Publicaciones Pedro Domecq México.

Ripoll Perelló, E. (1977), *Las Cuevas del Monte Castillo*, Ed. Patronato de las Cuevas Prehistóricas de Santander, Dirección General del Patrimonio Artístico y Cultural, España.

Robinson, A. H., J. L. Morrison, P. C. Muehrcke, A. J. Kimerling and S. C. Guptill, (1995), *Elements of Cartography*, 6th ed., USA.

Smith, T. R., S. Menon, J. L. Starr and J. E. Estes (1978), "Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems", *International Journal of Geographical Information Systems*, no. 1, pp. 13-31.

tMCG (1993), *Geographic Information Systems: Department of Foreign Affairs and International Trade*, The Mexico Consulting Group, Ontario.

Thrower, N. J. W. (2002), *Mapas y civilización. Historia de la Cartografía en su contexto cultural y social*, Universidad de Barcelona.

Valle, P. (1997), "Evangelización del Clero Regular", *Arqueología Mexicana*, Revista Bimestral, vol. IV, núm. 23, México.

Tobler, W. R. (1970), "A computer model simulation of urban growth in the Detroit Region", *Economic Geography*, 46(2), pp. 236-240.

Turco Greco, C. A. (1968), *Los mapas. Breve Historia del Mundo y su Imagen*, Ed. Universitaria de Buenos Aires, Argentina, p. 65.

Van den Broecke, M. P. R. (1996), *Ortelius Atlas Maps: an Illustrated Guide*, Ed. HES Publishers BV.

Capítulo 5. Los sistemas de información geográfica en la prevención de desastres: realidad y perspectivas

Irasema Alcántara Ayala
Departamento de Geografía Física
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

La utilización de los SIG no escapa al ámbito de la prevención de desastres. En diversas partes del mundo, tanto en instituciones académicas, como gubernamentales, se hace referencia a la utilidad de los SIG para la identificación y evaluación de peligros o amenazas, el análisis de vulnerabilidad y el manejo de los riesgos. Sin embargo, para poder entender el papel que estas herramientas desempeñan en el ámbito de la mitigación de desastres, es importante partir de un marco conceptual de gestión del riesgo que contemple la dinámica existente entre los elementos esenciales: amenaza-peligro y vulnerabilidad.

De forma general y paradójica, la evolución de los enfoques teóricos de los originalmente llamados "desastres naturales" ha demostrado que los desastres no son naturales, sino la expresión de la fusión de factores de la dinámica terrestre (amenazas o peligros), y de la diversidad de los entes sociales involucrados (vulnerabilidad). Lo anterior incita a extraviar la idea de una naturaleza agresiva, fuente de calamidad, cuyo impacto social obedece intrínsecamente a las leyes naturales, y aun para ciertas comunidades, a los actos o castigos de algún dios.

El riesgo debe entonces entenderse como un proceso construido en una dimensión espacial definida, a partir de la coexistencia de amenazas –en este caso de origen natural– y del grado de susceptibilidad (económica, política, social y cultural) o vulnerabilidad de la población expuesta, expresión evidente de la resiliencia o capacidad de enfrentar y recuperarse de un estadio de trastorno insólito.

En consecuencia, este capítulo aborda la utilidad de los SIG en la identificación, caracterización y evaluación de las amenazas o peligros de origen natural, específicamente los sismos, la actividad volcánica, las inundaciones, los procesos

de remoción en masa y los tsunamis; así como el papel que juegan en los análisis de vulnerabilidad, la gestión del riesgo y la prevención de desastres.

Identificación y evaluación de amenazas

Antecedentes

Desde la década de los ochenta fue evidente que la utilización de herramientas con un componente espacial sería de gran valor en muchas áreas del conocimiento, y particularmente para los especialistas en Ciencias de la Tierra. Dicha necesidad se ilustra claramente con la publicación de una serie de mapas de la Bahía de San Francisco (Estados Unidos de América), creados a partir de factores básicos, tales como sistemas de fallas activas, intervalos de recurrencia, epicentros, magnitudes e intensidades, entre otros, y que dieron a su vez origen a la generación de "mapas interpretativos" de probabilidad de aceleración, áreas potenciales de licuefacción, respuesta sísmica de unidades geológicas, regiones potencialmente inestables, zonificación para planeación de uso del suelo, etc. (Radbruch-Hall, 1978).

Es así como surgen por ejemplo metodologías pioneras, a través de "programas de computadora" capaces de sobreponer cartografía de distinta índole, con la idea de producir mapas derivados de la combinación de los mismos. Entre otros, este fue el caso de la generación de un mapa que mostraba la estabilidad relativa de la superficie terrestre durante un sismo en la región de UTAH (Estados Unidos), el cual fue desarrollado en un sistema con capacidad de almacenamiento flexible, de fácil manipulación, con capacidad gráfica y con la posibilidad de ser utilizado en proyectos geológicos de distinta índole; desde mapas de terrenos cristalinos y sedimentarios, hasta mapas de zonas de explotación de recursos minerales (Van Driel, 1980).

A partir de ello, entre las acciones más trascendentales para el desarrollo de los SIG y sus aplicaciones potenciales, la Fundación Nacional para la Ciencia de Estados Unidos de Norte América (National Science Fundation), se dio a la tarea de enlistar y priorizar las necesidades de investigación en el ámbito de la retrospección y fotogrametría. De manera particular, se manejó la urgencia de crear sistemas digitales de bases de datos para elaborar mapas por computadora con estándares, especificaciones y pautas bien establecidos (ASCE-National Science Foundation Committee, 1982).

Gracias a dichas iniciativas, emergieron no sólo necesidades particulares de operación, sino también de creación de sistemas de información geográfica con la capacidad de coadyuvar en la zonificación de áreas críticas por amenazas de

origen natural, tales como las erupciones volcánicas, inundaciones, sismicidad, etcétera.

Sismicidad

La superficie terrestre, en gran medida influenciada por la tectónica global, expresa su carácter dinámico mediante la sismicidad. Si bien los sismólogos se han dado a la tarea de entender la estructura y deformaciones corticales, propagación de ondas, fuente sísmica, sismotectónica, rupturas de fallas, y monitoreo sísmico, entre otros temas, también es trascendente señalar que la aplicación de toda esa ciencia básica, generada principalmente en las últimas décadas, se materializa al desarrollar investigaciones enfocadas en la amenaza sísmica.

Es así como diversos SIG han sido adaptados y creados con la finalidad de efectuar tres tipos de tareas fundamentales. Primero, aquéllas vinculadas exclusivamente con el conocimiento, y la evaluación de la amenaza, tales como el manejo de datos sísmicos históricos, el análisis de las características tectónicas y distribución espacio temporal de epicentros, construcción de modelos y mapas sismotectónicos regionales, estimación de intensidad sísmica, microzonificación, modelación teórica y análisis retrospectivos de zonas sísmicas críticas, construcción de mapas digitales probabilísticos de amenazas sísmicas primarias y secundarias (*e.g.* explosiones de gas, incendios), propagación y secuencia de réplicas sísmicas, etc. Segundo, actividades relacionadas con la evaluación del impacto de la sismicidad, entre las que cabe destacar: zonificación de daños derivados de la ocurrencia de sismos particulares (infraestructura, vivienda, líneas vitales, etc.), evaluación de amenaza en función de la vulnerabilidad estructural de las construcciones y las condiciones del suelo, sistemas de evaluación de daños y de manejo de datos para zonas urbanas y rurales, detección de edificios colapsados por sismicidad, etcétera.

La tercera tarea se centra en la interfase con la sociedad, es decir, con las acciones ligadas al impacto de la sismicidad en los núcleos poblacionales desde la perspectiva del riesgo, de tal manera que es esencial, por ejemplo, determinar la distribución de patrones de densidad temporal de la población en áreas metropolitanas o rurales, caracterizar la vulnerabilidad de las comunidades, evaluar la respuesta humana (estado de conciencia, conocimiento, actitud y conducta) a la sismicidad, establecer sistemas de información de respuesta de emergencia por sismos, identificar zonas prioritarias para promover la resiliencia de los grupos sociales, estimar pérdidas económicas con base en los elementos expuestos, entre otros.

Actividad volcánica

El vulcanismo ha sido sin lugar a dudas uno de los fenómenos naturales más espectaculares que el hombre ha podido disfrutar y aprovechar. Suelos fértiles asociados a particulares tipos de actividad volcánica, así como la solemnidad de tradiciones y creencias, han hecho de estos altares naturales una atracción para diversos asentamientos humanos. Es, sin embargo, esta misma fascinación, fuente de amenaza directa-indirecta y constante para los grupos humanos asentados en dicho entorno.

El impacto de esta amenaza depende primordialmente del tipo de volcanismo existente, ya sea monogenético o poligenético. El primero se caracteriza por tener un solo periodo de actividad (aunque puede durar varios años como el caso del volcán Paricutín en Michoacán), en tanto que el segundo, por el contrario, es resultado de una serie de erupciones a lo largo del tiempo (*e.g.* Popocatépetl). Al mismo tiempo es importante considerar el tipo de actividad volcánica respectiva, ya sea efusiva o explosiva. Las erupciones efusivas, naturales en el volcanismo monogenético, son comunes en regiones con magma básico, es decir, compuesto por elementos ferro-magensianos, en tanto que las eruptivas son características de magmas de intermedios a ácidos, con mayor porcentaje de sílice. El volcanismo explosivo, frecuente en volcanes poligenéticos, es fuente de amenaza constante en diversas regiones del mundo.

Consecuentemente, además del monitoreo *in situ* de los volcanes activos más importantes del planeta –principalmente los poligenéticos–, un gran número de científicos ha aprovechado las bondades de los SIG para enriquecer las labores encaminadas a la identificación y evaluación de amenazas volcánicas, especialmente con base en los cambios o alteraciones morfológicas existentes, potenciales o consecuentes asociadas a tal actividad. En este sentido, los SIG han sido utilizados en el análisis de la evolución estructural de volcanes, la actividad y crecimiento de cráteres, la evaluación de los efectos de fallas y deformación resultado de la acumulación de magma, evaluación de la influencia de la topografía en el emplazamiento de tubos y coladas de lava, estimación de inestabilidad de laderas en conos volcánicos, modelación de flujos piroclásticos, predicción y modelación de zonas afectadas por lahares, etcétera.

Desde la perspectiva del riesgo han surgido también investigaciones que abordan temas como la modelación de escenarios de impacto potencial asociado a erupciones volcánicas, creación de SIG de regiones volcánicas específicas con fines de transferencia informativa acerca de volcanes activos, análisis de escalas e incertidumbre de modelos digitales del terreno para la predicción de amenazas volcánicas, visualización en 3D de amenazas volcánicas con fines de difusión,

mapeo de actividad volcánica en tiempo real, y predicción de riesgo y planes de rescate y evacuación por flujos piroclásticos u otras amenazas particulares.

Inundaciones

De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED; Domínguez *et al.*, 1999), las inundaciones en México son originadas por fenómenos naturales de tipo hidrometeorológico como los ciclones o huracanes (en los meses de junio a octubre) y las tormentas extra-tropicales en el invierno; su magnitud y duración dependen de la periodicidad y recurrencia de dichos fenómenos. Algunos factores condicionantes de estos eventos son: la distribución espacial de la lluvia, la topografía, el tipo de suelo, y las características de los arroyos y ríos, en especial la forma y longitud de sus cauces. Las inundaciones se pueden presentar por lluvias (pluviales), desbordamientos de ríos (fluviales), ascenso del nivel medio del mar (costeras), y por ruptura de bordos, diques o presas principalmente.

Las inundaciones constituyen una amenaza común en el territorio mexicano. Sin embargo, es importante diferenciar las lentas de las repentinas; las primeras pueden desarrollarse en el transcurso de unos días, en tanto que las segundas pueden originarse inclusive en tan solo algunos minutos. Las inundaciones repentinas indudablemente implican amenazas con mayor poder erosivo y destructivo, en tanto que los efectos de ambos tipos pueden ser estrictamente locales, o bien regionales.

La topografía es sin lugar a dudas el factor esencial en la ocurrencia de inundaciones, siendo la delimitación de cuencas hidrológicas un ingrediente necesario en la zonificación de las mismas. En consecuencia, el uso de los SIG, y en particular de los Modelos Digitales del Terreno (MDT), se convierte en instrumento óptimo para efectuar este tipo de investigaciones. De manera particular es común llevar a efecto tareas como la delimitación de áreas de inundación en función de información histórica, modelación y predicción de áreas de inundación en cuencas asociadas a huracanes u otros eventos hidrometeorológicos extraordinarios (Figura 1), estimación y modelación de profundidades de inundación (Figura 2), evaluación del impacto del uso del suelo en inundaciones, análisis de susceptibilidad a inundaciones y pérdidas económicas potenciales, entre otros.

Procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa, comúnmente conocidos como deslizamientos o derrumbes, son movimientos de ladera que ocurren por la influencia de la gravedad y sin la asistencia primordial de un agente de transporte fluido (Brunsden, 1979); pueden involucrar materiales de todo tipo, ya sea suelos, detritos o rocas.

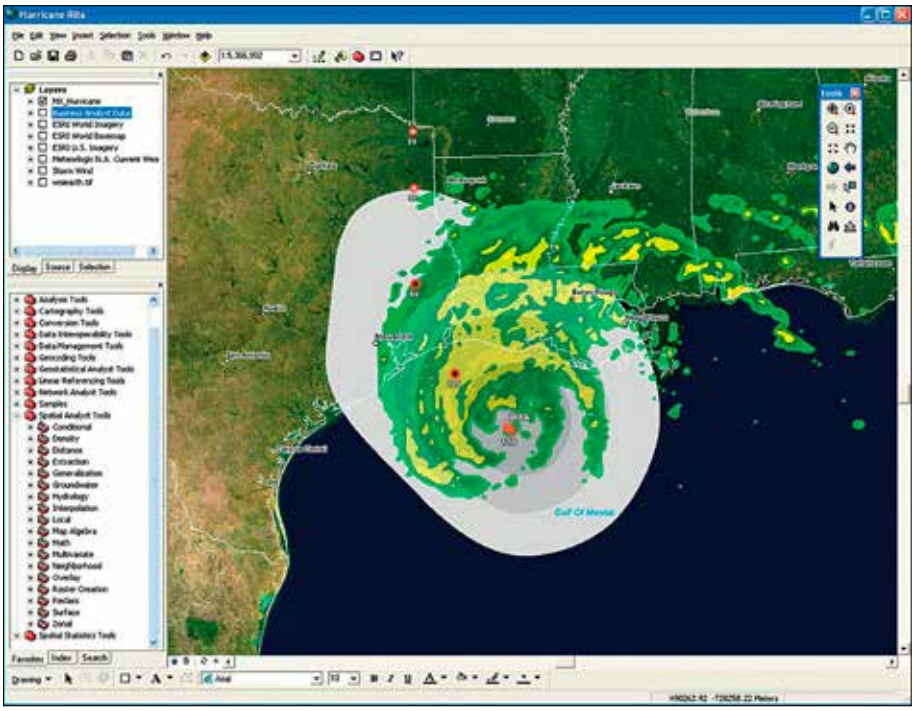


Figura 1. Trayectoria del huracán Rita en la costa sureste de Estados Unidos, y Sistema de Información de Respuesta al desastre asociado (fuente: http://www.esri.com/disaster_response/hurricanes/graphics/rita/rita3_lg.jpg).

Estos procesos son parte natural de la evolución del relieve, sin embargo, la influencia antrópica acelera tal dinámica convirtiéndolos en amenazas. En este sentido es posible englobar los diversos factores que determinan la estabilidad de una ladera (Alcántara, 2000); entre ellos cabe destacar los de índole geológica (materiales intemperizados, sensibles, discontinuidades, permeabilidad contrastante, etc.), por procesos físicos (precipitación intensa, actividad sísmica, erupciones volcánicas, etc.), causas morfológicas (erosión fluvial, erosión marina, levantamientos tectónicos) y de origen antrópico (excavación de laderas, incremento de peso, deforestación, actividad minera, vibraciones artificiales, etc.).

Estudiosos de los diversos tipos de procesos de remoción existente han aprovechado en gran medida las bondades de los SIG, principalmente como consecuencia del papel que juega el relieve o las características topográficas en la inestabilidad de laderas. Así, se tiene que áreas con pendientes mayores que el ángulo de fricción interna de los materiales serán potencialmente inestables, además de

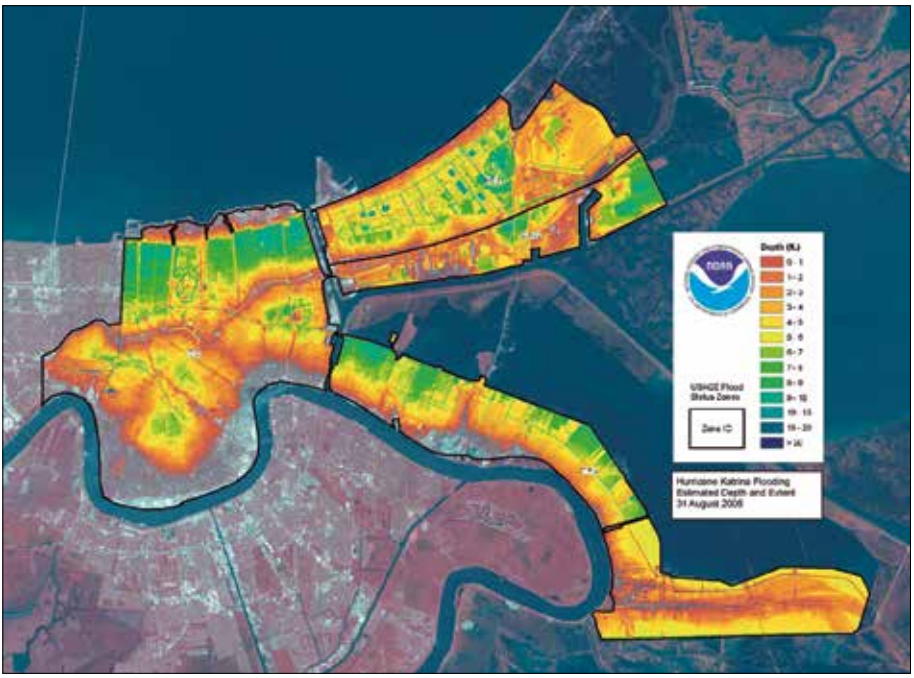


Figura 2. Estimación de la profundidad de inundación con base en un modelo digital del terreno de 10 m de resolución en un sector de Nuevo Orleáns a consecuencia del huracán Katrina (fuente: http://www.esri.com/disaster_response/hurricanes/graphics/katrina/katrina_est_water_depth_lg.jpg).

que superficies cóncavas serán favorables para la concentración de humedad y consecuentemente para la iniciación de movimientos. Si bien los movimientos de ladera son procesos muy complejos que resultan de la interacción de múltiples factores, tanto naturales como humanos, es factible manipular dichas interacciones mediante la utilización de SIG, lo cual permite crear escenarios de laderas inestables específicas, o bien zonificar áreas potenciales de inestabilidad.

De esta forma han surgido aplicaciones concretas que incluyen la modelación espacio-temporal de zonas susceptibles a procesos de remoción en masa (Figura 3), zonificación por métodos estadísticos multivariados, evaluación de amenazas potenciales por deslizamientos y flujos de escombro u otro tipo de movimientos, análisis bidimensionales y tridimensionales de estabilidad de laderas, modelación numérica de fractales, celular autómata, difusa, o basada en simulaciones Monte Carlo, y redes neuronales. Además de ello, y por lo general en una etapa inicial, se llevan a cabo análisis de las características morfológicas de

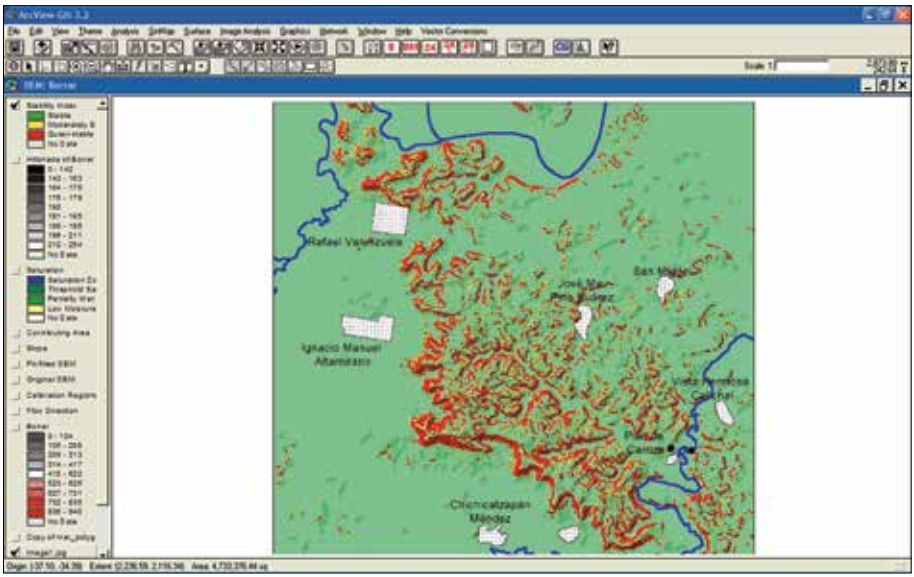


Figura 3. Zonificación de inestabilidad de laderas en Tecolutla, Veracruz, utilizando SINMAP en plataforma ArcView (Garnica, 2003).

las laderas inestables, así como evaluaciones de susceptibilidad a inestabilidad de laderas a partir de cambios de uso del suelo. Se analizan no sólo deslizamientos activos, sino también los inactivos, ya que representan áreas potenciales de reactivación.

Evidentemente la utilización de los SIG ha permitido desarrollar programas específicos con la finalidad de evaluar la inestabilidad de las laderas no sólo en el ámbito de su ocurrencia espacial, sino también temporal. Esto es significativo ya que además de que los movimientos *per se* pueden tener velocidades muy variadas (Cruden y Varnes, 1996), y en consecuencia un impacto diferencial, también las modificaciones al paisaje condicionan su dinámica.

Tsunamis

Un maremoto o *tsunami* (término de origen japonés: *tsu,* bahía o puerto, *nami* ola; "ola de puerto") se genera cuando las ondas sísmicas se propagan por el mar. Son olas enormes que alcanzan mayor altura al aproximarse a la costa; en mar abierto pueden tener velocidades de más de 800 km/hr, en tanto que su longitud de onda puede llegar a los cientos de miles de kilómetros, razón por la cual es primordial conocer su trayectoria total. Cuando llegan a la zona costera, olas de pocos centí-

metros o metros de profundidad son capaces de aumentar su tamaño hasta entre 10 y 50 m. En consecuencia, la velocidad de un tsunami está en función de su longitud de onda y de la profundidad del fondo marino: si es de 10 o 15 m, la velocidad puede acercarse a los 30 km/hr.

De manera general, el papel de los tsunamis como amenaza de origen natural había sido subestimado hasta diciembre del 2004. Momento en que, a consecuencia del tsunami del sureste asiático, 304 566 personas perdieron la vida (EM-DAT), principalmente en diez países. Las afectaciones fueron devastadoras no sólo por pérdidas humanas y económicas, sino también en el ámbito de los ecosistemas, tales como corales, manglares y humedales; además de que algunas especies de la fauna sufrieron lesiones irreversibles. El tsunami de Asia fue ciertamente un fenómeno extraordinario, por la magnitud del sismo generador y por su impacto.

A raíz de dicho desastre, y aprovechando las capacidades intrínsecas de los SIG, han surgido distintas iniciativas con la finalidad de hacer evaluaciones relacionadas con la vulnerabilidad en puertos y planeación comunitaria ante sismos y tsunamis, la predicción del impacto potencial en pérdidas de vida debido a tsunamis e incorporación de actividades de evacuación, así como la modelación de áreas de impacto con distintos escenarios de incidencia de tsunamis a partir de diversas fuentes sismogénicas (Figura 4).

Vulnerabilidad, riesgos y prevención de desastres

Indudablemente el entendimiento de las amenazas es parte importante para el manejo de los riesgos, sin embargo, es la vulnerabilidad el factor clave para poder concebir el impacto de tales fenómenos en la sociedad. Cabe recordar que los riesgos resultan de la combinación de un peligro o amenaza con la vulnerabilidad de la población expuesta, siendo que esta última está determinada tanto por ámbitos sociales y económicos, como por aquéllos de la esfera política y cultural de un grupo específico. Es de precisar también, que aun con el avance de la ciencia y la tecnología, no es posible modificar la génesis, dinámica y ocurrencia de tales fenómenos, de manera que las amenazas continúan presentándose –e inclusive algunas con mayor frecuencia– en tiempo y espacio en diversos territorios del globo. Sin embargo, contrariamente a la amenaza, al ser la vulnerabilidad un elemento no estático y diferencial, es posible disminuirla a través de acciones concretas en y para la población involucrada, de tal forma que se convierte en la única alternativa viable para reducir el riesgo.

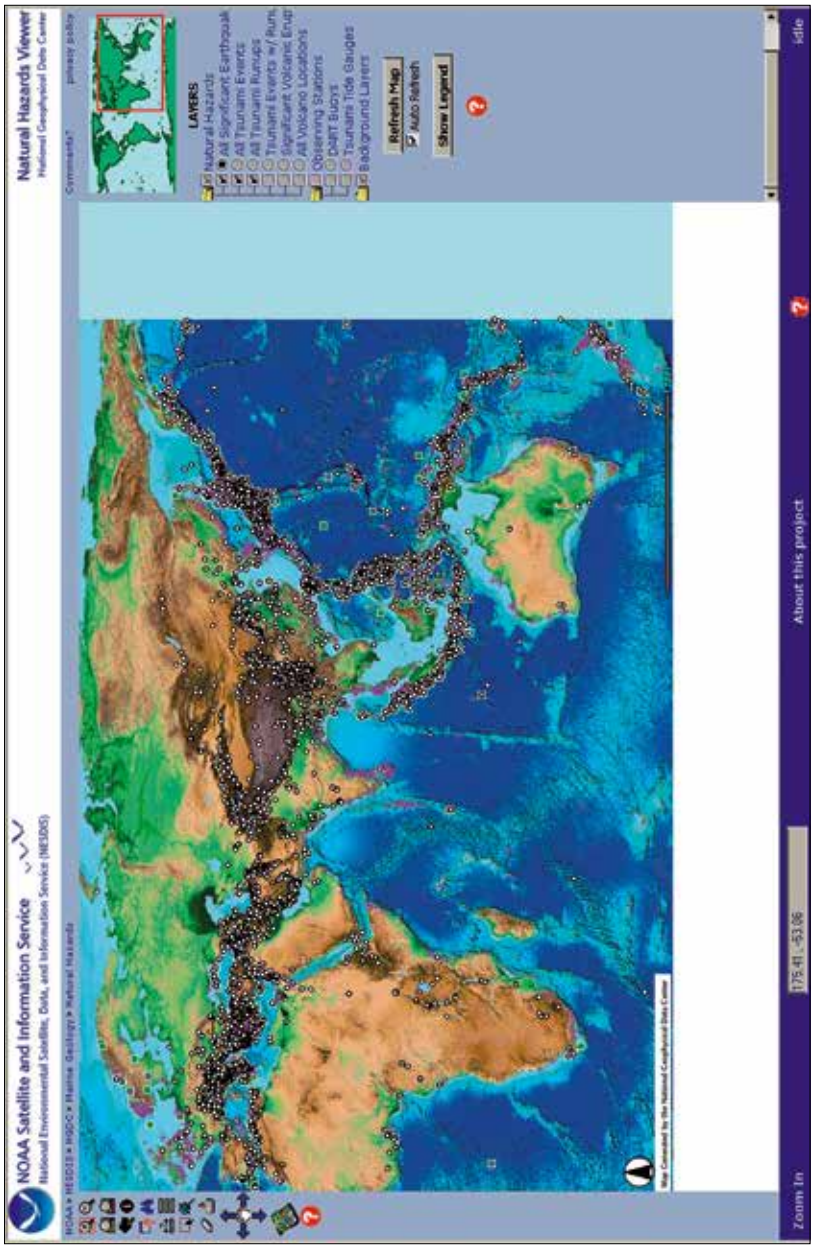


Figura 4. Sistema de información visual interactivo para el sismo y el tsunami del sureste Asiático del 2004 desarrollado por NOAA (fuente: http://map.ngdc.noaa.gov/website/seg/hazards_tsunami_122604/viewer.htm).

Tan solo algunos esfuerzos se han encaminado a utilizar adecuadamente los SIG en el ámbito de la vulnerabilidad y el análisis de riesgos. Lo anterior debido fundamentalmente a la errónea apreciación de los elementos que constituyen el riesgo. Es común por lo tanto encontrar estudios que abordan la vulnerabilidad como sinónimo de amenaza, o bien, aquéllos en que se considera que el riesgo está determinado únicamente por el impacto de un fenómeno natural específico.

Existen algunas estrategias internacionales que buscan analizar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo en el ámbito global. Por ejemplo, como parte del Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (UNDP) se ha realizado un índice de patrones anuales de vulnerabilidad y riesgo global (*Global Risk and Vulnerability Index Trends per Year*: GRAVITY; Peduzzi *et al*., 2002), el cual consiste en una evaluación de la exposición física y la identificación de variables socio-económicas que conducen a altos niveles de vulnerabilidad empleando una plataforma SIG. Sin embargo, a pesar de que esta tarea representa un avance en el diseño de una metodología de evaluación de riesgos, adolece de una cohesión íntegra, la cual se deriva de los conceptos obsoletos utilizados en el marco teórico (UNDRO, 1979), mismos que comprometen una estructura frágil que no considera escenarios realistas de riesgo.

Por otro lado, un ejemplo más integral, es el ofrecido por Chakraborty *et al*. (2005), quienes en el marco también de un SIG, efectuaron un análisis para evaluar estrategias de evacuación con base en la variabilidad espacial del riesgo por huracanes, prestando atención especial a la vulnerabilidad social. Su estudio sugiere que tanto el riesgo como la vulnerabilidad producen patrones espaciales muy variables, de tal manera que el manejo de emergencias se puede complicar considerablemente. Aunado a ello, consideran que distintas dimensiones de la vulnerabilidad social también pueden entorpecer las estrategias de evacuación, produciendo prácticas ineficientes, por lo que es fundamental considerar cuidadosamente las características de las comunidades a nivel local.

A partir de estudios integrales como el de Chakraborty y colaboradores, se justifica plenamente la necesidad de contemplar en un sentido estricto las interacciones entre la amenaza o peligro con la vulnerabilidad poblacional (Figura 5); de esta conjunción se desprende el entendimiento de las dinámicas particulares, a partir de las cuales es factible no sólo conocer el estadio de riesgo, sino también el carácter de la resiliencia local, elementos que sin lugar a dudas son esenciales para poder proyectar la prevención de desastres.

Se considera entonces que existe una construcción del riesgo; en su parte inicial fundada por la existencia de una amenaza –en este caso de origen natu-

ral– pero paralela y subsecuentemente determinada por la vulnerabilidad. Por consiguiente, un desastre será, entonces, la concretización del riesgo.

Es claro que los análisis de vulnerabilidad y riesgo todavía distan de poseer una articulada metodología de evaluación, o bien no forman parte de un sistema holístico en el que se analicen de manera conveniente todos los ingredientes involucrados. Aunado a ello, en países en vías de desarrollo como México, frecuentemente la reducción del riesgo por desastres queda enfrascada en una esfera imaginaria, ya que las políticas gubernamentales se concentran en gran medida en la "reacción" más que en la prevención, y pocas veces los esfuerzos son canalizados en la atenuación o disminución de la vulnerabilidad de la población involucrada.

El carácter de la multiplicidad y dinámica de los procesos socio-ambientales que determinan el *status quo* del riesgo en una sociedad específica, exige la crea-

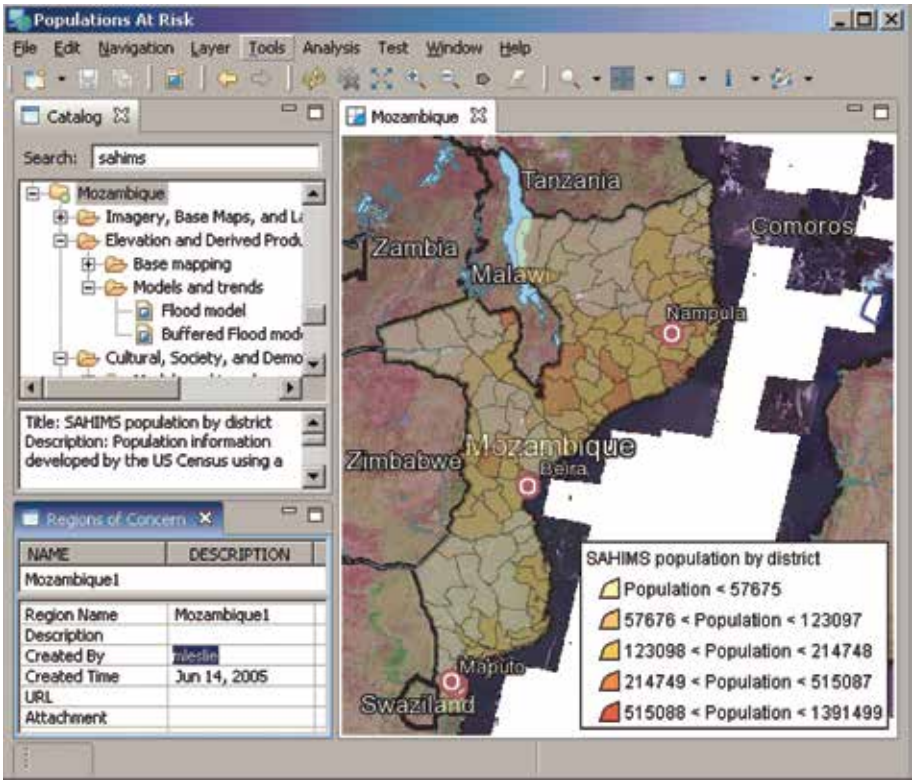


Figura 5. Población en riesgo por inundación en Mozambique (fuente: http://udig.refractions.net/confluence/download/attachments/6182/popAtRisk.png).

ción e implementación de políticas participativas que consideren no sólo los efectos potenciales o consecuencias de una amenaza, sino la complejidad de los escenarios de riesgo y sus actores. En este sentido, para dejar atrás el momento de la innovación técnica y el deseo de realizar análisis quiméricos, sería trascendental que la realidad estuviera marcada por la utilidad de los SIG como herramientas básicas y efectivas para la toma de decisiones en función de la evaluación holística de escenarios de riesgo concretos.

Discusión y conclusiones

La dimensión espacio-temporal de las amenazas o peligros de origen natural conlleva a la utilización y optimización de las bondades de los sistemas de información geográfica, de tal manera que es factible efectuar zonificaciones de áreas afectadas y potencialmente afectables. Es común entonces encontrar trabajos en los cuales el mapeo de amenazas es elemento esencial. Contrariamente, han sido poco relevantes los análisis de vulnerabilidad y riesgo desarrollados hasta el momento.

La variabilidad espacial de los patrones de vulnerabilidad –diferencial y dinámica– tiene un sello particular que demanda la utilización de herramientas como los SIG, con el propósito de identificar, analizar y representar de manera óptima las debilidades y capacidades de los actores inmersos en el proceso de construcción del riesgo, y particularmente en la etapa de su concretización, es decir, durante la ocurrencia de un desastre.

Casos como el tsunami del sureste asiático del 2004, o bien como el huracán Katrine en Estados Unidos, dan cuenta de que la complejidad de los escenarios de riesgo está dada no sólo por la amenaza *per se*, sino por el marco organizativo, legislativo, político, cultural, social, económico e inclusive psicológico de la sociedad en cuestión, el cual es reflejo de la vulnerabilidad socio-territorial y de la dinámica de sus actores. Ciertamente la ciencia y la tecnología no garantizan la prevención de desastres aun en sociedades desarrolladas o también llamadas del primer mundo. Es entonces una estrategia holística, requisito indispensable para poder crear, analizar y modificar la complejidad social y natural expresada en los diversos escenarios de riesgo.

Si bien el desarrollo tecnológico en el que están inmersos los SIG al tener la viabilidad de combinarse con otras herramientas como las imágenes de satélite, radar, etc., ofrece la posibilidad de integrar variables relacionadas con elementos tanto sociales como naturales, es importante puntualizar que las contribuciones que se puedan hacer en el ámbito de la prevención de desastres van de la mano

del diseño de metodologías adecuadas que contemplen la complejidad de los desastres como proceso y fruto de la interacción de múltiples actores.

Cabe enfatizar, no obstante, que hasta el momento de manera general las contribuciones de los SIG en el área de desastres se han centrado básicamente en cinco aspectos: *a)* mapeo o caracterización de la distribución espacial de amenazas; *b)* modelación de escenarios históricos y probabilísticos de la ocurrencia de un peligro o amenaza determinada; *c)* zonificación del impacto de desastres de magnitud variada; *d)* identificación de las características de la población expuesta o afectada, y *e)* como medio informativo o de difusión para tomar medidas post-evento.

Por todo lo anterior, sería verdaderamente trascendental cristalizar la pertinencia de contemplar análisis de vulnerabilidad (con miras a su reducción), manejo y creación de escenarios de riesgo, e idealmente confeccionar medidas bien estructuradas de prevención de desastres coadyuvados por las capacidades brindadas por los SIG en el ámbito espacio-temporal de las correspondientes complejas interacciones naturaleza-sociedad.

Es prudente señalar que en efecto, los SIG poseen un potencial de gran relevancia en el terreno de la prevención de desastres, y que si bien esta última gira en función del entendimiento y del establecimiento de metodologías específicas para la evaluación de la amenaza o peligro, y el análisis y reducción de la vulnerabilidad, así como de la implementación de una gestión del riesgo adecuada a la realidad, la certidumbre de los resultados quedará soslayada por la información empleada. En este sentido, evidentemente tal potencial es configurado por la información *per se* con la que se alimentan los SIG, de tal manera que la calidad de los datos a distintas escalas, su existencia, inexistencia, disponibilidad y la factibilidad de actualización determinarán en gran medida, los frutos que estas herramientas puedan ofrecer.

Finalmente, cabe destacar que en el amplio abanico de posibilidades de aplicación brindadas por los SIG, también los desastres relacionados con la ocurrencia de peligros o amenazas antropogénicas –las cuales no fueron abordadas en este documento– pueden ser inscritos en la óptica de la utilización y aprovechamiento de estas herramientas.

Vademécum: los avances de la ciencia y la tecnología son prominentes, el progreso de los sistemas de información geográfica prometedor, su efectividad en la prevención de desastres todavía fortuita, y las perspectivas [...] imperiosamente colosales.

Agradecimientos

La autora agradece el apoyo financiero otorgado por DGAPA, a través del proyecto PAPIIT IN-304306, así como del CONACYT, a través del proyecto 49844.

Referencias

Alcántara-Ayala, I. (2000), "Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 41, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-25.

ASCE-National Science Foundation committee (1982), "Surveying and photogrammetry research needs", *Civil engineering ASCE*, 52, 2, pp. 62-66.

Brunsden, D. (1979), "Mass movements", in Embleton, C. and J. Thornes (eds.), *Process in Geomorphology*, Arnold, London, pp. 130-186.

Chakraborty, J., G. A. Tobin and B. E. Montz (2005), "Population evacuation: assessing spatial variability in geophysical risk and social vulnerability to natural hazards", *Natural Hazards Review*, ASCE 6-1, 23, pp. 2211-2229.

Cruden, D. M. and D. J. Varnes (1996), "Landslide types and processes", in Turner, A.K. and R. L. Schuster, *Landslides - Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report* 247, pp. 36-75.

Domínguez, R., M. Fuentes, Oscar y F. García J. (1999), *Inundaciones*, CENAPRED Secretaría de Gobernación, Fascículo 3, México.

EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database - www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels – Belgium.

Garnica-Peña, R. J. (2003), *Riesgos por inundaciones e inestabilidad de laderas en el municipio de Tecolutla, Veracruz*, tesis de Licenciatura, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México (inédita).

Peduzzi, P., H. Dao and Ch. Herold (2002), *Global Risk and Vulnerability Index Trends per Year (GRAVITY) Phase II: Development, analysis and results*, UNEP/DEWA/GRID-Geneve.

Radbruch-Hall, D. H. (1978), "Examples of engineering geologic mapping in seismically active areas of the United States", *Bulletin International Association of Engineering Geology,* no. 18, pp. 15-26.

UNDRO (1979), *Natural Disasters and Vulnerability Analysis in Report of Expert Group Meeting*, United Nations Disater Relief Coordinator, 9-12 July, Geneva: UNDRO.

Van Driel, J. N. (1980), "Computer-composite mapping for geologists", *Environmental Geology* 3-3, pp. 151-157.

Capítulo 6. Aplicación de las técnicas de Evaluación MultiCriterio en el ambiente SIG: el caso de la identificación de zonas para la reforestación del parque nacional Nevado de Toluca

Sergio Franco Maass
Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (UAEMex)
Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

La Evaluación MultiCriterio (EMC) comprende un conjunto de técnicas que permiten evaluar diversas alternativas de elección a la luz de múltiples criterios y prioridades. Desde el punto de vista espacial, las alternativas son unidades de observación o porciones del territorio que se evalúan con base en sus características geográficas. La aplicación de la EMC en el contexto de la Geografía permite asistir en los procesos de ordenamiento territorial mediante la obtención del nivel de adecuación del territorio para el mantenimiento de los ecosistemas naturales y para el desarrollo las actividades productivas.

El paradigma de la EMC comenzó a desarrollarse en el ámbito de las ciencias económicas en la década de los años sesenta y se consolidó a principios de la década de los setenta. Surgió como respuesta al paradigma decisional de la investigación operativa, el cual planteaba como principio "... la búsqueda de una decisión óptima maximizando una función económica" (Barba y Pomerol, 1997). La decisión multicriterio puede ser "discreta", cuando se analiza un conjunto finito de alternativas, o "continua" (de programación lineal con criterios múltiples), cuando se analiza un número infinito de alternativas.

En términos generales, la evaluación multicriterio discreta se basa en la construcción de una matriz que "... refleja las características de un conjunto dado de alternativas de elección a partir de una serie de criterios" (Voogd, 1983). Dicha matriz ha recibido diversos nombres: matriz de puntuaciones, matriz de efectividad

o matriz de proyecto-efecto. Voogd (1983) y Barredo (1996) le denominan matriz de evaluación y Barba y Pomerol (1997) la definen como matriz de decisión.

La matriz de decisión [a_{ij}] "... expresa las cualidades (valor numérico o simbólico) de la alternativa o unidad de observación i con respecto a los n atributos considerados" (*Ibid.*). El conjunto de elección se refiere al conjunto de alternativas o entidades geográficas diferentes, caracterizadas por una serie de atributos que, cuando se les añade un mínimo de información relativa a las preferencias del decisor, se consideran criterios. Si los criterios corresponden a evaluaciones numéricas se les denomina cuantitativos y cuando no presentan una unidad canónica de medida se les conoce como cualitativos. Una vez construida la matriz de decisión es posible aplicar algún procedimiento de evaluación que permita asignar a cada alternativa un valor que refleje la medida en que dicha alternativa cumple con el objetivo planteado en la evaluación.

Desde el punto de vista espacial, la EMC requiere de datos sobre la distribución territorial de los valores de los criterios. Los mapas o capas de criterios y las preferencias del decisor se agregan de acuerdo con una regla de decisión que arroja una solución óptima. Así la EMC se convierte en un soporte fundamental para la decisión espacial. Esto se debe a su aplicabilidad para el análisis del nivel de adecuación del territorio. La posibilidad de integrar criterios sociales, políticos, ambientales, económicos, etc., en un ambiente SIG ha aumentado estas capacidades, convirtiéndola en una importante alternativa para la resolución de problemas territoriales (Wood y Dragicevic, 2007).

En este capítulo se revisan algunos aspectos importantes a tomar en consideración para aplicar las técnicas EMC en el ambiente de los sistemas de información geográfica (SIG). Dado que, como lo mencionan Joerin y otros (2001), no existe un método que parezca ser eficiente para todo tipo de aplicaciones de toma de decisiones, la discusión y el ejemplo aplicativo se centran en los métodos compensatorios más utilizados, en particular la Combinación Lineal Ponderada. Es así como, mediante la revisión de los principales componentes metodológicos, se desarrolla un ejercicio de aplicación para la zonificación del parque nacional Nevado de Toluca con miras a la reintroducción de especies forestales nativas. Ante los serios problemas de deforestación y deterioro ambiental en el área natural protegida y dada la ineficacia de los programas oficiales de reforestación, se plantea la necesidad de determinar el nivel de adecuación del territorio para el desarrollo y eventual reintroducción de los bosques de pino, oyamel, aile y encino.

Los SIG como sistemas de apoyo a la decisión espacial

Desde la perspectiva funcional, los SIG se conciben como "sistemas de apoyo a la decisión espacial" (Nyerges, 1993). La naturaleza flexible de los SIG les confiere una gran aplicabilidad para el desarrollo de aplicaciones relacionadas con la valoración del nivel de adecuación del territorio. Una decisión es una elección entre acciones alternativas, hipótesis, localizaciones y demás, que generalmente implica considerar múltiples criterios para obtener el nivel de adecuación (expresada en grados de variación continua) de cada localización en consideración (Jiang e Eastman, 2000).

De acuerdo con Malczewski (1999), las tres grandes fases de la decisión espacial: inteligencia, diseño y evaluación, pueden ser implementadas en el ambiente SIG. Existen, sin embargo, algunos problemas.

Inteligencia. Reconocimiento del problema de decisión espacial (diferencia entre el estado deseado y el estado existente de un sistema geográfico del mundo real). Los SIG permiten la colecta y el análisis de grandes volúmenes de datos provenientes de fuentes muy diversas. Si bien es posible tener un panorama general más detallado, facilitando la racionalización del problema, presentan serias deficiencias para la exploración sistemática, ya que no incluyen posibilidades de análisis estadístico que permitan profundizar en el estudio del problema, tanto desde el punto de vista temático como espacial. Esto obliga al uso de otro tipo de programas complementarios (Bosque, 2004).

Diseño. Inventar, desarrollar y analizar un conjunto de posibles soluciones al problema. Implica el desarrollo de modelos (representaciones simplificadas o abstractas de la realidad) con miras a apoyar la toma de decisiones mediante la identificación de un conjunto de alternativas. Malczewski (1999) señala que, a pesar de su papel central en el diseño, la mayoría de los SIG carecen de suficientes capacidades analíticas y de modelado para generar el conjunto de alternativas de decisión. En general se utilizan las funciones básicas, pero éstas no permiten incluir en el análisis las preferencias del decisor ni considerar la gran complejidad de las relaciones espaciales entre los objetos. Los SIG no son lo suficientemente flexibles como para considerar variaciones del contexto ni del proceso de decisión espacial. De acuerdo con Bosque (2004), los SIG están más preparados para la manipulación inicial de los datos que para tratar de resolver problemas geográficos concretos y especializados. Esto obliga a la inclusión de modelos explicativos específicos y a la utilización de programas complementarios.

Elección. La evaluación de alternativas involucra la selección de un curso particular de acción (alternativa) a partir de las alternativas disponibles. Cada

alternativa es analizada y evaluada en relación con las otras y en términos de una regla de decisión, utilizada para ordenarlas o calificarlas. Malczewski (1999) señala que el aspecto crítico radica en las limitaciones de los SIG para la incorporación de las preferencias del decisor en el proceso. Bosque (2004) destaca las limitaciones de los SIG para evaluar alternativas a partir de datos imprecisos. En este sentido los SIG están limitados y son poco flexibles, lo que los convierte en herramientas en un ambiente de modelado muy estático.

La evaluación multicriterio en el ambiente SIG

La evaluación multicriterio (EMC) es tal vez la operación de apoyo a la toma de decisiones más importante de los SIG (Jiang e Eastman, 2000). Desde el punto de vista procedimental, el desarrollo de cualquier aplicación de SIG implica el cumplimiento de diversas etapas (Nyerges, 1993):

1. *Definición del problema y de las necesidades de procesamiento de información.* El problema se concibe como la diferencia entre el estado deseado y existente. Las tareas o aplicaciones para resolver los problemas requieren de funciones (también llamadas operaciones con los datos) agrupadas en cuatro grandes componentes o categorías: entrada / captura; gestión / almacenado; manipulación / análisis y; despliegue / salida. Cuando se busca determinar el nivel de adecuación del territorio, la meta no es un conjunto aislado de alternativas sino un mapa del índice de adecuación para toda la zona en estudio. La combinación SIG/EMC es un enfoque poderoso para lograr esto, dado que el SIG concede el manejo computacional de los criterios mientras que la EMC permite agrupar dichos criterios en un índice de adecuación (Joerin *et al.,* 2001).
2. *Definición de las funciones de entrada / captura.* Incluyendo diversos procesos tales como la digitalización y limpieza de los datos geográficos, la construcción de topología y la validación de los datos.
3. *Definición de las funciones de gestión de datos.* Incluye la descripción de los datos espaciales, debidamente indexados y referenciados. Se trata de funciones enfocadas a preparar los datos para la fase de análisis. El propósito del análisis EMC basado en SIG es el de "proveer un mayor conocimiento y comprensión de los fenómenos, más que prescribir una solución correcta" (Malczewski, 2000:21).

4. *Definición de las funciones de análisis.* Incluye las operaciones necesarias para el modelado de los datos geográficos. Para estructurar el problema de decisión es necesario definir un método analítico que genere soluciones basadas en axiomas comprobables y en una traducción precisa de los juicios del decisor. Se trata de métodos de agregación que permiten conjuntar las medidas unidimensionales de los atributos (capas o layers) y los juicios del decisor (preferencias e incertidumbres). La regla de decisión determina en qué nivel cada alternativa cumple con el objetivo. El análisis de la información espacial implica el uso de operaciones básicas o fundamentales (útiles para un amplio rango de aplicaciones) y avanzadas. Dentro de las funciones básicas destacan: operaciones geométricas de bajo nivel consideradas como simples herramientas para construir relaciones entre objetos espaciales: medición, reclasificación, sobreposición, vecindad y conectividad. En lo referente a las funciones avanzadas es posible mencionar, a manera de ejemplo: capacidades de manipulación estadística y matemática de los datos con base en modelos teóricos: funciones de modelado estadístico (estadística descriptiva, análisis multivariado, análisis de clusters, análisis de componentes principales, análisis de correlación, análisis geoestadístico, etc.) y funciones de modelado matemático (optimización, optimización de redes, simulación; Malczewski, 1999). A pesar de contar con todas estas funciones de análisis, Bosque (2004) señala importantes deficiencias de los SIG. De acuerdo con el citado autor, los SIG han sido diseñados con un enfoque general y de reducida especialización. Es por ello que incluyen solamente aquellos procedimientos de uso generalizado. La preocupación fundamental es la consideración de aspectos más "externos", formales y geométricos, de los problemas geográficos. Los SIG, por lo tanto, no están preparados para estudiar los procesos internos que generan las estructuras visibles y "geométricas" de las cuestiones geográficas.
5. *Determinación de las operaciones de salida.* Introduce los procesos de edición y obtención de mapas, reportes y tabulados.

En términos generales los problemas de decisión espacial multicriterio incluyen seis componentes básicos:

a) una meta o conjunto de metas definidas por el decisor;

b) un orden de preferencias respecto a los criterios de evaluación (típicamente operacionalizadas mediante pesos asignados a los criterios de evaluación);
c) un conjunto de criterios de evaluación (objetivos y/o atributos) para evaluar las alternativas;
d) un conjunto de alternativas de decisión;
e) un conjunto de variables no controladas y
f) un conjunto de salidas o consecuencias asociadas a cada alternativa.

Tomando en cuenta los componentes básicos de aplicación de la EMC en el ambiente SIG, es preciso cubrir los siguientes pasos (Malczewski, 2000); descritos cada uno más adelante:

1. Definición del conjunto de atributos (objetivos y capas de atributos asociados).
2. Identificación del conjunto de alternativas posibles.
3. Obtención de mapas conmensurables de atributos (normalizados).
4. Definición de pesos de los criterios (importancia relativa de cada atributo).
5. Combinación de los mapas de atributos normalizados y ponderados utilizando una regla de decisión para obtener el puntaje total para cada alternativa.
6. Obtención del orden de las alternativas de acuerdo con su puntaje total de desempeño.

1. Definición del conjunto de atributos

De acuerdo con Barredo (1996), un objetivo es una función a desarrollar y, desde el punto de vista geográfico, implicaría la evaluación de un conjunto de elección, es decir, de un conjunto de unidades de observación. En la EMC, los problemas pueden requerir el planteamiento de un solo objetivo o ser de carácter multiobjetivo. En este segundo caso los objetivos pueden ser complementarios o conflictivos.

El criterio es el componente básico de la EMC y, de una manera general, se concibe como todo aspecto medible de un juicio, mediante el cual se puede caracterizar una de las dimensiones de las diversas alternativas de elección bajo consideración (Voogd, 1983). Eastman y otros (1993) describen un criterio como una cierta base que puede ser medida y evaluada. De acuerdo con Malczewski

(2000), un criterio de evaluación es un término genérico que incluye tanto al concepto de atributos como de objetivos. Un objetivo es un enunciado acerca del estado deseado de un sistema geográfico del mundo real e indica la dirección de mejora de uno o más atributos de un elemento del sistema. La cuantificación de un objetivo es la adopción de alguna escala que, directa o indirectamente, mide el nivel de logro (atributo). La relación entre objetivos y atributos tiene una estructura jerárquica (en el nivel más bajo están los atributos, indicadores cuantificables del grado de logro de los objetivos). En la toma de decisiones espaciales dichos atributos se pueden representar cartográficamente.

En un problema de decisión espacial dentro del ambiente SIG, tanto los atributos individuales como el conjunto de atributos deben poseer algunas propiedades. Los atributos deben ser "comprensibles" y "mesurables"; el conjunto de atributos debe ser "mínimo", estar "completo", ser "operacional", poderse "descomponer" y no ser "redundante". Estos principios difícilmente se cumplen en las aplicaciones EMC que suelen sujetarse a la disponibilidad de información geográfica.

En un SIG las unidades de observación cuentan con una serie de atributos cualitativos o nominales (ocupación del suelo, unidades edáficas, etc.) o cuantitativos (altitud, precipitación, etc.). Estos atributos por sí solos no reflejan las preferencias del decisor. En la EMC se aplica un procedimiento para traducir dichos atributos en puntuaciones o valores de preferencia (criterios).

En los SIG existen dos tipos de criterios:

Factor. Es un criterio que aumenta o disminuye a partir del nivel de adecuación de una alternativa específica para la actividad considerada y que, por lo general, se mide en una escala de razón, es decir, una escala de unidades de medida conocidas con origen indicado por el número "cero" (Voogd, 1983).

Restricción. Es un criterio que sirve como límite a las alternativas consideradas y que en muchos casos se representa en una escala binaria que expresa un orden parcial dado que representa información `si´-`no´ (Voogd, 1983). Así, las áreas a ser excluidas de la evaluación reciben un valor de cero y las zonas a ser consideradas reciben un valor de uno.

La información geográfica

Un aspecto a considerar en la definición de atributos es el referente a la naturaleza de la información geográfica que debe ser manipulada y analizada en el SIG. La información geográfica se refiere a todo dato geográfico (georreferenciado) que ha sido procesado (organizado, presentado, analizado e interpretado) en forma tal

que adquiere sentido en el análisis de toma de decisiones (Malczewski, 1999). Los datos geográficos pueden ser expresados en cuatro unidades básicas de medida (asignación de símbolos o números a los atributos de las entidades geográficas): Nominal (lista desordenada de categorías o clases descriptivas. La única relación que se establece es la de igualdad / desigualdad); Ordinal (lista de clases jerarquizadas, es decir, se establece además una relación mayor / menor); intervalo (lista de clases jerarquizadas que indica las distancias que separan entre sí a las entidades pero que tienen un cero arbitrario) y; de razón (lista de clases jerarquizadas que sí cuenta con un cero u origen absoluto de la variable; Bosque, 1997).

La información puede ser dura *hard* (también conocida como objetiva porque se deriva de hechos reportados, estimados cuantitativos o encuestas sistemáticas) o blanda *soft* (también conocida como subjetiva ya que representa opiniones, preferencias, prioridades o juicios). De acuerdo con Bosque (2004), en la actualidad los SIG permiten sobre todo la gestión de datos de tipo *hard*, no así el manejo de datos de tipo *soft* y mucho menos su uso simultáneo. Las bases de datos tropiezan con dificultades para almacenar datos poco precisos (no determinísticos) afectados por incertidumbres (probabilísticas o borrosos). Tampoco existen en los SIG técnicas y capacidades suficientes para manipular este tipo de datos imprecisos.

Otro aspecto a considerar en el manejo de la información geográfica es que los datos espaciales pueden ser representados en dos formatos o estructuras distintos: raster (matriz bidimensional de celdas regulares o grupos de celdas) y vector (entidades representadas por cadenas de coordenadas en función de sus dimensiones topológicas). La estructura raster permite la representación de datos de variación continua, facilitando los procesos de modelado e interpolación. La estructura vectorial permite el manejo topológico de la información geográfica, el manejo eficiente de los datos y la obtención de productos cartográficos más precisos y de mayor calidad (Malczewski, 1999).

Por otra parte, partiendo de la organización de la base de datos del SIG, los datos geográficos pueden expresarse en capas o *layer* o bien como objetos. Las capas son constructos de datos espaciales con constructos de datos de atributos adjuntos. Los objetos, por su parte, son descripciones de atributos culturalmente definidos (constructos de datos de atributos) con constructos de datos espaciales adjuntos. En el enfoque orientado a objetos, los datos espaciales y atributos se manipulan conjuntamente como objetos de significancia cultural bien definida para modelar los sistemas geográficos del mundo real (Nyerges, 1993).

Finalmente, los objetos geográficos pueden concebirse en función de límites bien definidos y naturaleza homogénea o de variación continua en el territorio.

En este segundo caso los fenómenos se manifiestan como gradientes y sin límites bien definidos. Esta imprecisión se concibe en términos de la teoría de conjuntos borrosos (clases de elementos u objetos que no tienen límites bien definidos entre aquéllos que pertenecen a una clase y aquéllos que no pertenecen; Malczewski, 1999). En las bases de datos de los SIG los conjuntos borrosos son dispositivos representacionales de entidades geográficas sin límites definidos en forma precisa, como objetos borrosos o zonas borrosas (una zona borrosa puede conceptualizarse como un conjunto de puntos o celdas).

2. Identificación del conjunto de alternativas posibles

Desde el punto de vista de los SIG, la definición del conjunto de elección dependerá en buena medida del modelo de datos utilizado. En el ambiente vectorial, se refiere a un conjunto de unidades de observación (expresados como puntos, líneas, polígonos, objetos, etc.) que deben ser evaluados. En el ambiente raster, por su parte, se asume que una alternativa se representa como un píxel individual o la combinación de píxeles.

En cualquier caso, se da por sentado que una alternativa es posible si cumple con todas las restricciones. Es preciso recordar que una restricción es un criterio que sirve como límite a las alternativas y que excluye de la evaluación las zonas donde no se puede lograr el objetivo planteado.

Un aspecto de especial relevancia al momento de definir el conjunto de alternativas es el problema de la escala. Tal como señala Malczewski (2000), ningún elemento del sistema geográfico es independiente de los componentes que lo rodean y, en este contexto, un fenómeno puede aparecer homogéneo a una cierta escala y heterogéneo a otra. Así, la mejor alternativa a un nivel de detalle no necesariamente será la más apropiada a otro nivel. El desencuentro entre la escala del problema (alternativas de decisión) y la escala a la cual operan los tomadores de decisiones, puede ser uno de los principales obstáculos en el uso eficiente y efectivo de las técnicas de decisión basadas en SIG. Cuando se utiliza la estructura raster es posible manejar distintas resoluciones espaciales y, por consiguiente, distintos niveles de agregación de la información geográfica. Esto puede repercutir en la obtención de resultados analíticos diferentes.

3. Obtención de mapas conmensurables de atributos

Como se ha mencionado previamente, la información geográfica suele expresarse en diversas escalas. Sin embargo, la mayoría de los métodos EMC que se aplican en ambiente SIG requieren que los atributos sean transformados en unidades comparables. Existen diversos métodos para lograr esta transformación: las funciones de *transformación lineal* (las más frecuentemente utilizadas) y las funciones de valor (curvas). En cualquier caso, una vez definida la función de transformación, todo se reduce a la conversión de los mapas de atributos mediante operaciones algebraicas (*Ibid.*).

Transformación de variables nominales a variables cuantitativas

En todo análisis geográfico las unidades de observación pueden estar caracterizadas por un conjunto de variables expresadas en diversas escalas de medida. Desde el punto de vista cuantitativo, por ejemplo, la precipitación tiende a expresarse en una escala de razón y la temperatura se maneja en una escala de intervalo. De igual manera, existe información geográfica como el tipo de ocupación del suelo que se manifiesta en forma nominal. Los métodos EMC más utilizados en SIG, sin embargo, requieren que todos los criterios se expresen en una escala de razón única. Es por ello que se hace necesaria la transformación de las variables para la construcción de una matriz de decisión numérica. Las variables, una vez transformadas a una escala numérica común, pasan a ser los criterios. Existen cuatro enfoques para determinar el valor de los criterios: *a)* determinación cuantitativa directa, *b)* determinación cualitativa directa, *c)* determinación cuantitativa indirecta y *d)* determinación cualitativa indirecta (Voogd, 1983). Son los enfoques relacionados con la determinación cuantitativa los que permiten la construcción de una matriz numérica. En la determinación cuantitativa directa se parte de la información cuantitativa disponible sobre una determinada variable para definir el valor numérico que refleje el orden de preferencia del decisor. En la determinación cuantitativa indirecta se recurre a la construcción de una matriz de comparación entre pares de categorías temáticas para definir, en términos numéricos, la importancia relativa de cada categoría con respecto a las demás.

Dentro de los métodos más recomendados para las aplicaciones EMC en el ambiente SIG destaca el método de las jerarquías analíticas (MJA) desarrollado por Saaty y descrito por Voogd (1983). El MJA permite la asignación de escalas cuantitativas a datos originalmente cualitativos, a partir de una matriz de comparación entre pares de elementos o categorías temáticas del criterio a transformar. El método postula que "... para un criterio determinado, se puede determinar un

conjunto de valores, denotados como *ei* (*i*, *i´*= 1, 2,...,*I*), que representen el grado en que dicho criterio satisface la alternativa i" (Voogd, 1983). El método establece que $\sum i=^{1}$I ei = 1 y que se requiere la construcción de una matriz A del orden *I* x *I* definida por los elementos $a_{ii'}$, donde $a_{ii'} = e_i/e_{i'}$.

Dado que los valores de dicha matriz pueden ser estimados por el decisor en función de diversas unidades y escalas de medida, Saaty (1977) justifica la elección de la siguiente escala de juicios:

Escala de juicios de valor propuesta por Saaty (1997)	
Valor de $a_{ii'}$	Cuando la variante i al compararla con la variante i´ es
1	igualmente importante
3	ligeramente más importante
5	notablemente más importante
7	demostrablemente más importante
9	absolutamente más importante

El manejo de esta escala se justifica porque permite la tasación de las variables sin superar el número de valores que la mente humana puede contemplar simultáneamente, recurriendo a valoraciones enteras con incrementos unitarios.

Una vez definidos los valores de la matriz de comparación por pares, es posible calcular el eigenvector principal de dicha matriz que representa, en este caso, el orden de prioridad de los valores o categorías temáticas del criterio considerado. El procedimiento general consiste en normalizar por columnas los valores de la matriz en función de $Na_{11}=a_{11}/\sum a_{1i'}$ y sumar los valores normalizados por filas para obtener el eigenvector principal o valor del criterio.

El MJA tiene la ventaja de que permite la obtención de una medida cuantitativa de la consistencia en la asignación de juicios de valor. Esta medida se conoce como razón de consistencia (c.r.) y no debe exceder 0.10 para considerar apropiados los juicios de valor asignados (Barredo, 1996). Malczewski (2000), sin embargo, afirma que este tipo de transformaciones resulta demasiado abstracto al decisor, en especial cuando se utiliza el intervalo 0-255 que busca cumplir con los estándares de despliegue de color superVGA.

Procedimientos de normalización

Como se ha mencionado previamente, la construcción de la matriz de decisión implica no sólo que las variables se expresen numéricamente, sino que se encuen-

tren en una misma escala de medida. Como lo señala Voogd (1983), aunque el valor de los criterios se encuentre expresado en escalas de razón, estos valores pueden ser mutuamente incompatibles si las escalas y las unidades de medida difieren entre sí. Se asume por tanto que los criterios deben ser evaluados sobre escalas comparables en tipo, rango de extensión, unidad de medida, eventual posición del cero, dispersión, etc. (Barba y Pomerol, 1997). La normalización resulta especialmente importante cuando el método EMC a utilizar produce una compensación entre los diferentes valores obtenidos por una misma alternativa respecto a criterios diferentes. Tal es el caso de la suma ponderada o el cálculo de la distancia al punto ideal.

En la evaluación multicriterio se normaliza cada columna de la matriz de decisión numérica $a=(a_1,a_2,...,a_n)$, mediante la aplicación de algún algoritmo, para obtener el vector normalizado $v=(v_1,v_2,...,v_n)$. Dentro de los métodos de normalización más utilizados destacan los procedimientos lineales y los procedimientos no lineales:

Ejemplo de procedimiento de normalización lineal. Se le resta a cada valor del criterio considerado el valor mínimo que presenta dicho criterio y se divide entre el rango de los datos. Este procedimiento de normalización lineal se interpreta como el porcentaje del rango y garantiza que los valores normalizados si cubrirán el intervalo [0,1], esto es, que el peor valor será 0 y el mejor 1. El método presenta la desventaja de que no mantiene la proporcionalidad (porque max $a_i/a_i \neq 1/v_i$), pero resulta aplicable cuando se presentan alternativas con valor 0 en el criterio en cuestión.

$$Vi = \frac{a_{1\,-\,min}\,a_1}{max\,a_{1\,-\,min}\,a_1} \times K.$$

Siendo K el valor de una constante que permite manejar un rango superior a la unidad, por ejemplo 100 o 255.

Ejemplo de procedimiento de normalización no lineal. De acuerdo con Jiang e Eastman (2000), la aplicación de conjuntos borrosos en la normalización de los criterios es muy atrayente porque provee una lógica **muy fuerte** en el proceso; sirve de puente entre la sobreposición binaria dura y permite la combinación lineal mediante el reconocimiento de la continuidad e incertidumbre en la relación entre criterios y el conjunto de elección. En términos generales, los valores se distribuyen de acuerdo con una ecuación no lineal. El programa de SIG IDRISI,

por ejemplo, permite la normalización de los datos a una curva en forma de "J" o a una curva de distribución normal (sigmoidal). En el segundo caso, se utiliza la ecuación:

$$\mu = \cos^2 \infty$$

En una función sigmoidal monotónicamente creciente, a se define como: (x-punto "a") / (punto "b" – punto "a") * Pi/2, cuando x es mayor al punto "b", entonces $\mu = 1$.

4. Definición de pesos de los criterios

Uno de los aspectos más relevantes de las técnicas EMC es que permiten asignar pesos diferenciados a cada uno de los criterios. Esto dependerá de la mayor o menor relevancia que el decisor asigne a cada uno de ellos. Se denominan pesos (o ponderaciones) a las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor (Barba y Pomerol, 1997). Se habla del vector de pesos $w = [w_1,...,w_n]$ al conjunto de pesos de una evaluación.

La asignación de pesos influye de forma determinante en los resultados obtenidos de la aplicación EMC y cuando se aplican métodos compensatorios de análisis, como la suma ponderada, los pesos w_j deben ser cardinales de razón ya que se utilizan como tasas de sustitución entre los criterios.

Entre los métodos más utilizados para la definición de pesos destacan: la tasación simple (asignación directa en las que el decisor define, a partir de su conocimiento o perspectiva del problema, la valoración de cada peso en una cierta escala de medida) y el cálculo de eigenpesos (mediante procedimientos de asignación indirecta basados en el cálculo del autovector dominante (*dominant eigenvector*) de una matriz de comparaciones binarias de los criterios).

Un aspecto a tomar en consideración es que la asignación de pesos a los mapas de atributos implica cambios en el rango de variación de dichos mapas. Tal como menciona Malczewski (2000), cada peso es multiplicado por un atributo para obtener el puntaje de cada alternativa, los pesos por tanto dependen de las unidades utilizadas en cada atributo y esto suele no comprenderse con claridad. Si el rango de valores es muy grande, el peso asignado a éste tiende a ser arbitrariamente grande. En este contexto, el método para definir el vector de pesos no es un asunto trivial sino que debe reflejar fielmente el orden de preferencias en un contexto espacial.

5. Combinación de mapas mediante la aplicación de una regla de decisión

Existen diversos métodos de evaluación multicriterio cuya aplicabilidad en el ámbito de los SIG depende, en buena medida, en la posibilidad de espacializar los criterios de análisis. De acuerdo con Jankowski (1995), algunos de los procedimientos se pueden implementar directamente en los SIG comerciales, recurriendo a las capacidades propias de procesamiento de bases de datos y otros, de difícil implementación directa, se pueden aplicar mediante programas específicamente diseñados para la EMC.

En la EMC existen dos tipos de métodos de evaluación, los métodos no compensatorios y los métodos compensatorios. En los primeros, el valor de un criterio no puede verse afectado por el valor de los demás criterios y las alternativas son evaluadas por el conjunto de criterios sin establecer una interacción entre ellos. El decisor, por tanto, no requiere establecer pesos cardinales para los criterios y basta con definir un orden de prioridad. Son muy difíciles de implementar en el ambiente SIG debido a que, en las decisiones espaciales, suele existir una enorme cantidad de alternativas a ser evaluadas.

Los métodos compensatorios, por su parte, asumen que el rendimiento de una alternativa en un criterio determinado puede compensarse por su rendimiento en otro u otros criterios. El valor de los criterios se ve afectado por la estructura de preferencias del decisor, e implica que las prioridades de los criterios se establezcan en forma de pesos cardinales. Este tipo de métodos es el que más se ha venido utilizando en las aplicaciones de SIG y pueden ser de tipo aditivo (suma ponderada) y de aproximación al punto ideal. En los métodos aditivos el valor total de cada alternativa se calcula multiplicando el peso de los criterios por el desempeño del criterio en dicha alternativa.

En términos generales, en los métodos de evaluación multicriterio se asume que los atributos son independientes entre sí en las preferencias. Esto difícilmente se cumple dado que los atributos tienden a interactuar. Otro problema radica en la interpretación de los puntajes finales obtenidos para cada celda o alternativa. En el valor resultante se desdibuja el grado de participación del valor del atributo o de su peso correspondiente. Independientemente de la técnica utilizada, se "niega la existencia de relaciones espaciales entre las alternativas" (Malczewski, 2000:19).

El método de la combinación lineal ponderada

De acuerdo con Jiang e Eastman (2000), en el ambiente SIG existen dos proce-

dimientos comunes para la MCE: el primero se refiere a la sobreposición binaria (todos los criterios se expresan como umbrales de adecuación que son entonces combinados mediante operadores lógicos de intersección o unión) y el segundo conocido como la combinación lineal ponderada (los criterios continuos "factores" se estandarizan o normalizan en un rango numérico y se combinan en un promediado ponderado). El procedimiento de la combinación lineal ponderada es el más conocido de los métodos compensatorios aditivos y permite obtener, para cada alternativa, un índice final de adecuación (r_i), mediante la ecuación:

$$r_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \; v_{ij},$$

donde: r_i el nivel de adecuación de la alternativa i,
w_j el peso del criterio j,
v_{ij} el valor ponderado de la alternativa i en el criterio j.

La combinación lineal ponderada es frecuentemente utilizada para el análisis de nivel de adecuación del suelo, para la selección de sitios y para problemas de evaluación de recursos. Su popularidad se debe a que:

1. Es muy fácil de implementar dentro del ambiente SIG utilizando operaciones de álgebra de mapas y modelado cartográfico.
2. Es fácil de entender e intuitivamente atractivo a los tomadores de decisiones (Malczewski, 2000).

En este procedimiento se asume que: *a)* los pesos de los criterios se pueden determinar en una escala de medida cuantitativa, *b)* los valores de los criterios están determinados en escala de razón y *c)* la agregación de la información se realiza mediante adición. Es evidente, sin embargo, que estos postulados son de difícil cumplimiento. La conversión de los criterios a valores en escala de razón y la definición de valores cuantitativos para los pesos, son tareas delicadas que no siempre reflejan con precisión las características del problema. Más aún, el método resulta especialmente sensible al orden de prioridad de los criterios seleccionados y al procedimiento para cambiar la dirección de los criterios a minimizar. Por otra parte, en lo referente a la posibilidad de que la decisión sea incorrecta, la combinación lineal de criterios continuos pareciera expresar una incertidumbre mayor, difícil de estimar en los métodos estocásticos (Jiang e Eastman, 2000).

El método de análisis de similitud a la solución ideal
Es un método compensatorio que basa su funcionamiento en el cálculo de las distancias de orden p entre cada alternativa y una solución ideal situada en un espacio multidimensional se obtiene mediante la ecuación:

$$d_p^M(a_i) = \left[\sum_{j=1}^{n} w_j \left| v_j^M - vi_j \right|^p \right]^{1/p},$$

donde: $d_p\ (a_i)$ la distancia al punto ideal de la alternativa i,
v_{ij}^M el valor normalizado de la alternativa i en el criterio j,
v_j el valor máximo normalizado en el criterio j,
w_j^M el peso del criterio j,
p métrica de distancia.

En este caso la mejor alternativa será aquella que presente una mayor proximidad al punto ideal.

Un aspecto importante, en este tipo de análisis, es que el orden de alternativas para un mismo problema puede variar en función del método con el que se trabaje. Es decir, los resultados podrán diferir dependiendo si se busca minimizar la proximidad al ideal o si se pretende maximizar la lejanía al anti-ideal. La Figura 1 muestra como el trabajar con el ideal o con el anti-ideal puede conducir a resultados diferentes. Si se considera un conjunto de cinco alternativas (A, B, C, D y E) a ser evaluadas a la luz de dos criterios, existe la posibilidad de que la alternativa con la menor distancia al punto ideal no presente la mayor distancia al anti-ideal. Este dilema se puede resolver de forma ecléctica mediante el cálculo de una razón de similaridad al ideal ($D_p(a_i)$).

6. Obtención del orden de las alternativas

El procedimiento para ordenar las alternativas en función de los valores obtenidos a partir de la función de decisión implica asignar a cada una de ellas el valor resultante. Esto puede ser problemático porque asume una independencia estricta entre las alternativas que, en términos generales, interactúan espacialmente. En este sentido, la calificación de una alternativa puede estar siendo influenciada por su dependencia con otras alternativas. En el ambiente raster se presenta el problema añadido de que las celdas mejor calificadas no necesariamente se encuentran agrupadas ni permiten la definición de zonas continuas.

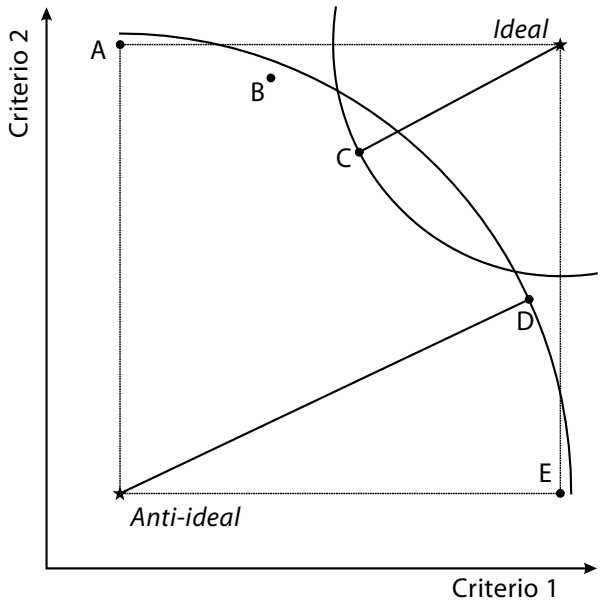


Figura 1. Ilustración del dilema de trabajar con el ideal o el anti-ideal (tomado de Barba y Pomerol, 1997:246).

La aplicabilidad de la EMC en el ambiente SIG

La principal función de los SIG es la de apoyar la toma de decisiones espaciales. En este contexto, la inclusión de metodologías como la evaluación multicrieterio es una tarea obligada. Los SIG son herramientas fundamentales para la gestión sistemática y eficiente de grandes volúmenes de información geográfica lo que posibilita su aplicación en escenarios complejos donde intervienen múltiples criterios.

De acuerdo con Franco (2003), existen dos estrategias básicas para la integración de las técnicas de EMC y los SIG. La primera se refiere al manejo acoplado de programas que se vinculan mediante un módulo de intercambio de archivos. La cual consiste en desarrollar funciones de evaluación multicriterio en el entorno SIG. Esto significa que las funciones de evaluación deben formar parte de la caja de herramientas del SIG a manera de módulos o comandos (Jankowski, 1995). Tal es el caso del Módulo MCE incluido en el programa IDRISI que contiene una versión modificada de la suma ponderada descrita por Eastman (1993):

$$r_i = \sum_{j=1}^{n} (w_j \, v_{ij})^* \prod c_j ,$$

donde: r_i el nivel de adecuación de la alternativa i,

w_j el peso del criterio *j*,
v_{ij} el valor ponderado de la alternativa *i* en el criterio *j*,
$\prod$ el producto,
cj el valor de la restricción *j*.

Las restricciones se definen como imágenes binarias (donde las áreas sin restricción reciben el valor 1 y las zonas a ser excluidas el valor 0).

7. Ejemplo de aplicación: determinación del nivel de adecuación del territorio para la reintroducción de especies forestales nativas en el parque nacional Nevado de Toluca

Planteamiento de los objetivos y definición del conjunto de elección

Como se ha mencionado previamente, la aplicación de la EMC en el entorno SIG implica, en una primera instancia, el planteamiento claro de los objetivos y la definición del conjunto de elección.

El parque nacional Nevado de Toluca forma parte del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Los extensos bosques templados en torno al volcán Xinantécatl o Nevado de Toluca, constituyen el principal suministro de servicios ambientales del Valle de Toluca. A pesar de su importancia como resguardo del patrimonio natural del Estado de México, el parque nacional se ha venido deteriorando como resultado de la intervención humana. De acuerdo con Franco y otros (2006), los bosques nativos del parque nacional se están viendo amenazados por una marcada tendencia al cambio de uso del suelo y una creciente presión antrópica regional, lo que repercute en la pérdida de la biodiversidad, en la proliferación de plagas y enfermedades y en la afectación de los suelos. Con base en el estudio de los cambios en la cobertura del suelo ha sido posible estimar que el Nevado de Toluca presenta una tasa general de deforestación del 0.31% anual, lo que representa una pérdida superior a las 150 ha de bosques cada año. Esta situación es especialmente preocupante en el caso de los bosques de pino cuya tasa de deforestación es superior al 1.2% anual. En el 2000, las zonas no forestales del parque nacional cubrían más de 15 400 ha, lo que representaba cerca del 30% de la superficie total del área natural protegida.

El objetivo central de la aplicación fue la caracterización climático-edáfica del parque nacional Nevado de Toluca y, mediante la aplicación de las técnicas de evaluación multicriterio en el ambiente SIG, definir el nivel de adecuación del territorio para la reintroducción de especies forestales nativas. En términos

generales, se trataba de una evaluación multiobjetivo con cuatro objetivos complementarios: la definición del nivel de adecuación de las zonas no forestales para la introducción de pino (*Pinus spp.*), oyamel (*Abies religiosa*), aile (*Alnus sp.*) y encino (*Quercus sp.*). En este contexto el conjunto de elección se refiere a todas aquellas áreas dentro del parque nacional (píxeles o polígonos) elegibles para la reforestación.

El ejercicio que aquí se presenta se basa en un modelo de datos raster y retoma algunos conceptos de la metodología para la Zonificación Agro Ecológica (ZAE), desarrollada por la FAO con la finalidad de caracterizar el territorio en función de la aptitud de tierras, la producción potencial y el impacto ambiental, que puedan tener cierto tipo de actividades productivas en el entorno rural. Las zonas agro-ecológicas son las porciones del territorio que cuentan con características similares de clima y suelo, es decir, el mismo potencial biofísico, para la producción agrícola o forestal (FAO, 1985). La metodología ZAE fue desarrollada para predecir la productividad potencial de las especies agrícolas o forestales e incorpora una serie de bases de datos, enlazadas a un SIG e incluyen la aplicación de modelos de análisis multicriterial (FAO, 1997).

Obtención de la Matriz de Criterios Normalizados

Definición de las variables a utilizar

Como se ha mencionado previamente, en los SIG de tipo raster el conjunto de alternativas a ser evaluadas está constituido por un número finito de píxeles, cada uno de los cuales pasa a ser una unidad de observación. El problema se centra en definir el conjunto de criterios a utilizar para evaluar y comparar cada uno de dichos píxeles y esto depende, en buena medida, de la disponibilidad de información.

El Cuadro 1 presenta los principales requerimientos de las especies forestales que se desarrollan en el Parque Nacional Nevado de Toluca.

Variables meteorológicas. El área que corresponde al PNNT cuenta únicamente con tres estaciones meteorológicas. Por esta razón fue preciso analizar la información correspondiente a 64 estaciones ubicadas alrededor de la zona en estudio. El mayor número de estaciones contaba entre 11 y 20 años de observaciones y se encontraba entre los 2 300 y los 2 800 msnm. Los datos de temperatura y precitación se obtuvieron de la Base de Datos del Observatorio Meteorológico Nacional actualizada al 2003. Para el procesamiento de los datos de temperatura se calcularon las medias mensuales y posteriormente las medias anuales. En el caso de la variable de precipitación se obtuvieron sumatorias mensuales y posteriormente las sumatorias anuales. Una vez calculados los valores anuales y globa-

Cuadro 1. Principales requerimientos de las principales especies forestales

Especie	Temperatura (°C)			Precipitación (mm)			Suelo	Altitud (msnm)		
	Mín.	Ópt.	Máx.	Mín.	Ópt.	Máx.		Mín.	Ópt.	Máx.
Quercus sp. (Encino)	-3	12	22	400	800[2]	900[2]	Anvi (2) Anme (3) Anum (3)	750	3000	3200[1]
Pinus hartwegii (Pino)	-20	12	38	800	1150	1500	Anph (1) Anmo (1) Anme (3) Anum (3)	3000	3300	3600
Abies religiosa (Oyamel)	-12	11	20	1000	1150[2]	1300[2]	Anph (1) Anmo (1) Anme (3) Anum (3)	2500	3200	3600
Alnus acuminata (Aile)	4	17	27	800[2]	900[2]	1200[2]	Anph (1) Anmo (1) Anvi (2) Anme (3) Anum (3)	1500	2800	3350[1]

Anph (1) – Andosol páchico
Anmo (1) – Andosol mólico
Anvi (2) – Andosol vítrico
Anme (3) – Andosol melánico
Anum (3) – Andosol úmbrico
[1] Datos calculados con base en el MDT de la zona en estudio.
[2] Datos calculados con base en la distribución de precipitaciones en la zona en estudio.

les, fue posible obtener los valores interpolados de precipitación y temperatura, mediante la aplicación de un SIG.

Tipo de suelo. Para la obtención del mapa de suelos del parque nacional se realizó un levantamiento de 4° orden que, por su nivel de detalle, se ajusta a los requerimientos de inventarios generales y proporciona información detallada para formular recomendaciones de manejo forestal.

Altitud. Con base en la información digital de curvas de nivel, escala 1:50 000 del INEGI, fue posible obtener, mediante interpolación, el modelo digital del terreno del parque nacional. Este modelo permitió derivar la información altitudinal.

Uso del suelo y vegetación. Se utilizó el mapa de uso del suelo y vegetación, escala 1:37 500 elaborado en el 2000 por Regil (2005). Para efectos de la reintroducción de especies forestales nativas se consideraron las siguientes categorías de ocupación:

Tipos de ocupación del suelo aptos para la reforestación
Pastizal
Pastizal – Agrícola
Agrícola – Pastizal
Agrícola
Pastizal con bosque fragmentado
Agricultura con bosque fragmentado

Construcción de los criterios de análisis

Temperatura. El rango de temperatura en la región varía entre 3 y 12º C. Tomando en cuenta los requerimientos de cada especie forestal (Cuadro 1) se aplicó, al mapa de temperaturas medias, el procedimiento de normalización sigmoidal simétrico, tomando como puntos extremos los valores mínimo y máximo descritos para cada una de las especies y como valores centrales el óptimo, en el cual se desarrolla dicha especie. La Figura 2a permite observar el mapa resultante para el caso del encino.

Precipitación. El rango de precipitación en la región se sitúa entre 840 y 1 350 mm anuales. Al igual que en el caso de las temperaturas se asumieron los valores mínimo, óptimo y máximo para obtener una normalización sigmoidal simétrica correspondiente a cada una de las cuatro especies forestales consideradas. Esto se ejemplifica para el caso del encino en la Figura 2b.

Uso del suelo. Para la construcción de este factor fue preciso pasar de una escala nominal a una escala de razón. Para ello se aplicó el método MJA, descrito previamente. Esto implicó elaborar una matriz de comparación entre pares de las categorías, definiendo la importancia relativa de acuerdo con la escala recomendada por Saaty, y calcular el eigenvector (e_{ij}) de la matriz para definir el valor relativo de cada categoría; esto puede verse en el Cuadro 2.

Con estos datos se reclasificó el mapa de uso del suelo y vegetación para obtener los mapas de adecuación, tal y como se ejemplifica para el encino en la Figura 2d.

Cuadro 2. Matriz de comparación entre pares de las categorías

	Pastizal	Pastizal – Agricultura	Agricultura – Pastizal	Agricultura	Pastizal – Bosque	Agricultura – Bosque	e_{ij}	Valor normalizado
P	1						0.3537	255
P – A	1/2	1					0.2116	153
A – P	1/2	1	1				0.2116	153
A	1/3	1/2	1/2	1			0.1237	89
P – B	1/5	1/4	1/4	1/3	1		0.0589	42
A – B	1/7	1/5	1/5	1/3	1/2	1	0.0405	29
								c.r. = 0.01

Construcción de mapas de Restricción

Son coberturas que permiten excluir del análisis aquellas porciones del territorio en donde no es posible cumplir con el objetivo planteado. Las áreas a ser excluidas de la evaluación reciben un valor de cero y las zonas donde si es posible realizar la actividad reciben un valor de uno.

1. Vegetación natural. Se eliminaron aquellas regiones ocupadas por bosques densos y semidensos (Figura 2e).

2. Suelo. Se excluyeron las zonas cuyo tipo de suelo no se consideraba adecuado para el desarrollo de cada una de las especies (Figuras 2f).

Aplicación del Método de Evaluación Multi Criterio

Para la evaluación del territorio y la identificación de su potencial agro-ecológico se aplicó el método de la suma ponderada del módulo MCE del programa IDRISI. Este procedimiento general se describe en la Figura 3 y consistió en la superposición aditiva de cuatro factores y la superposición multiplicativa de dos restricciones. Con miras a no introducir mayor subjetividad en el análisis, no se aplicaron pesos diferenciados para cada uno de los factores de adecuación.

La aplicación del procedimiento de análisis para cada uno de las especies forestales permitió obtener los mapas de adecuación por especie (Figura 4).

Como es posible observar, el pino y el oyamel son las especies que presentan los mayores niveles de aptitud. El aile y el encino, por su parte, presentan sus niveles más elevados en la ladera norte, hacia los límites del parque nacional Nevado de Toluca. En cualquier caso, aunque los requerimientos de cada especie varían y por consiguiente difieren los valores que asumen los criterios de análisis, existen evidentes sobreposiciones en los niveles de aptitud. Es decir, se presentan zonas aptas para la introducción de dos o más especies forestales. Por esta razón, fue preciso llevar a cabo un procedimiento de análisis que permitiera asignar las zonas más apropiadas para cada una de las especies forestales. En términos generales el procedimiento de análisis consistió en realizar una serie de superposiciones cartográficas substractivas que permitieron aislar, para cada una de las cuatro especies, el conjunto de píxeles cuyo nivel de adecuación era superior en comparación con el nivel que presentaban esos mismos píxeles para las otras tres especies forestales. De esta manera fue posible obtener cuatro mapas con los niveles de aptitud más elevados de cada tipo de bosque (Figura 5).

Finalmente, con base en los mapas de distribución de la mayor aptitud por especie forestal y mediante procedimientos de superposición cartográfica, se de-

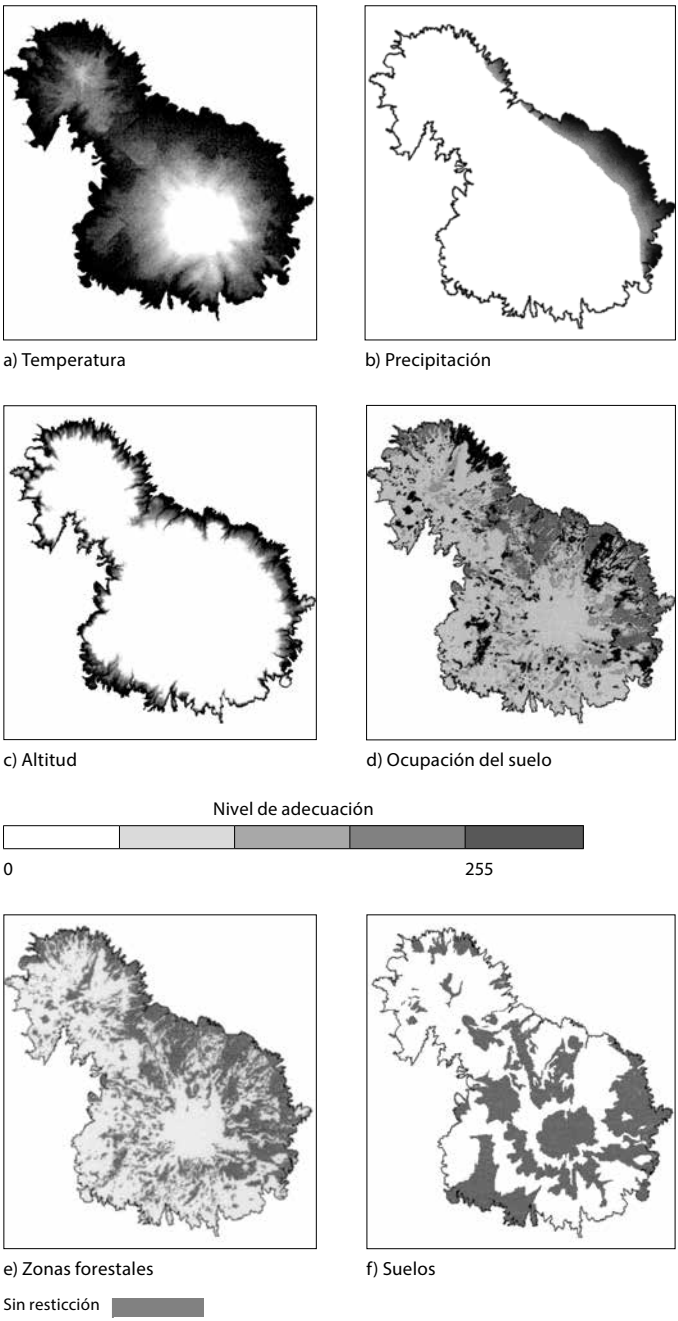


Figura 2. Factores de adecuación y restricciones para la repoblación de encinos.

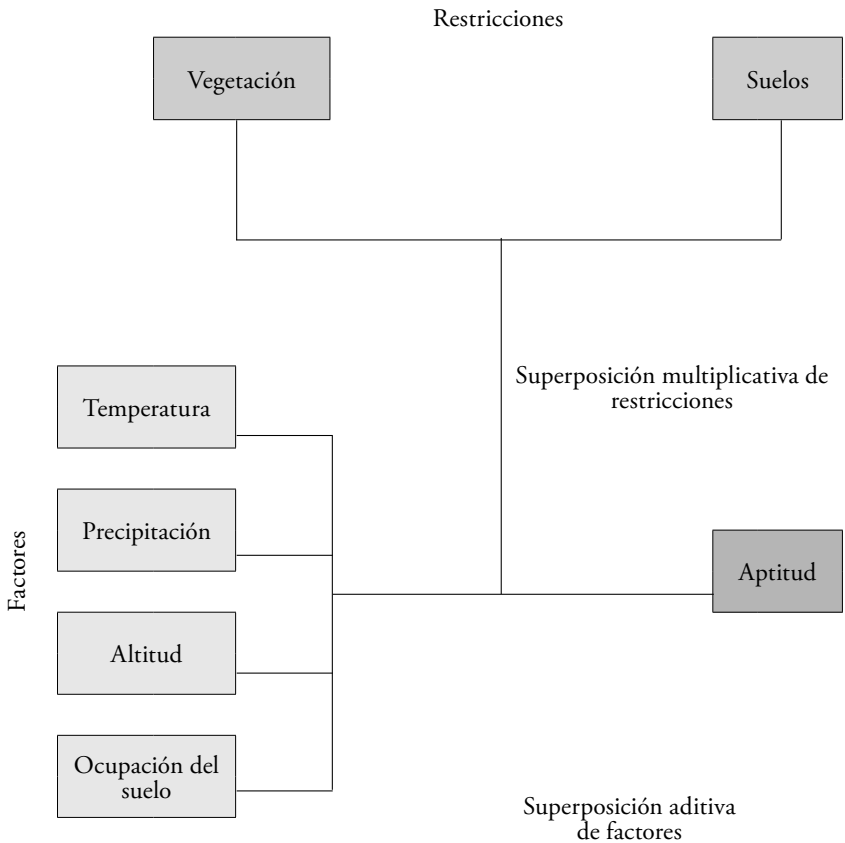


Figura 3. Diagrama general de análisis.

rivó un mapa final de zonas propuestas para la reforestación del parque nacional Nevado de Toluca con las especies nativas más representativas (Figura 6).

Como es posible apreciar, la región muestra un mayor nivel de adecuación de los bosques de coníferas, en particular los bosques de pino que comprenden poco más de 10 900 ha. Existen además cerca de 4 900 ha que presentan una mayor aptitud para repoblación con abetos. Las zonas adecuadas para la reintroducción del aile alcanzan las 2 600 ha y, finalmente, las áreas adecuadas para la siembra de encinos ronda las 1 300 ha. En términos generales, partiendo del conocimiento de la zona y del comportamiento de la cobertura del suelo, los re-

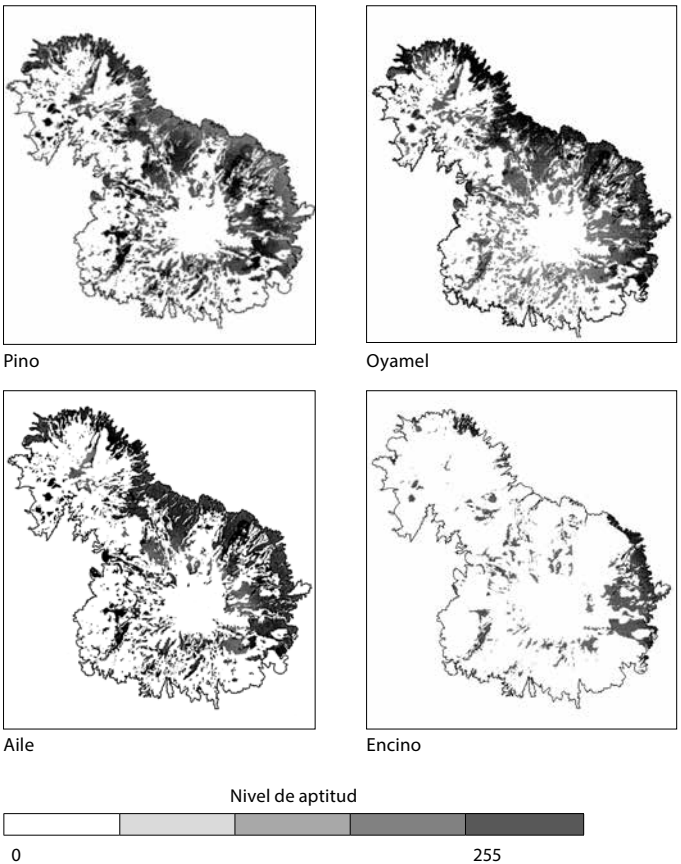


Figura 4. Mapas de aptitud por especie.

sultados obtenidos son muy satisfactorios y pueden servir como guía para que el decisor implemente estrategias de reforestación.

Conclusiones

La evaluación multicriterio constituye la operación de apoyo a la toma de decisiones más importante de los SIG, éstos permiten conjuntar en un mismo ambiente de trabajo grandes volúmenes de información geográfica y mediante diversas operaciones de análisis, obtener un panorama general más detallado y racional de los problemas del territorio.

En la toma de decisiones espaciales los atributos se representan cartográficamente facilitando con ello los procesos de modelación espacial. En este sentido

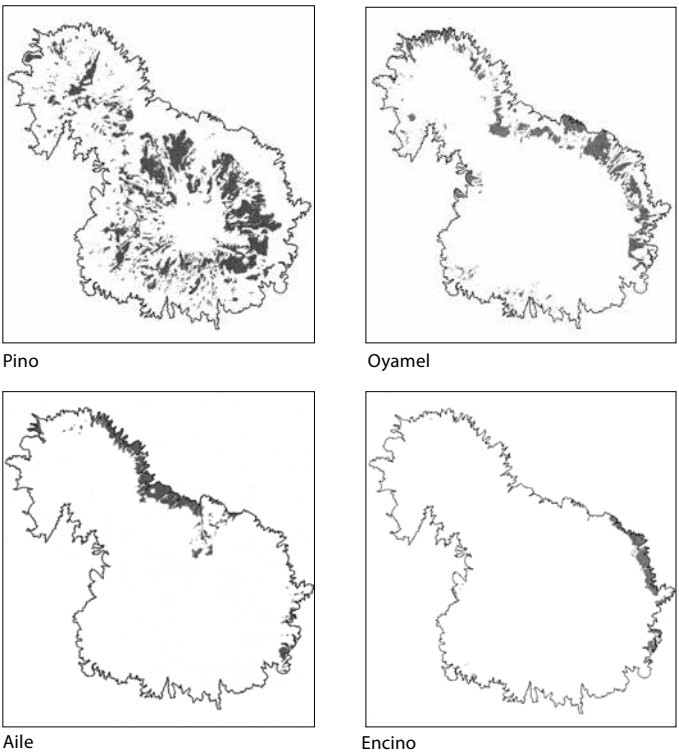


Figura 5. Zonas de mayor aptitud por especie forestal.

la estructura raster resulta especialmente útil para la representación de datos de variación continua.

Desde el punto de vista de los métodos de combinación, la combinación lineal ponderada es muy utilizada en el ambiente SIG, ya que resulta muy fácil de implementar utilizando operaciones de álgebra de mapas y modelado cartográfico, y es fácil de entender.

Idealmente, la aplicación SIG-EMC implicaría grandes ventajas:

- la posibilidad de incorporar la dimensión espacial en la resolución de problemas multicriteriales;
- la posibilidad de efectuar complejas interacciones entre múltiples objetivos, frecuentemente conflictivos, bajo un enfoque territorial y partiendo del conocimiento experto del decisor sobre los múltiples criterios;
- la posibilidad de lograr un enfoque más racional, más objetivo y menos sesgado para la toma de decisiones de localización, y

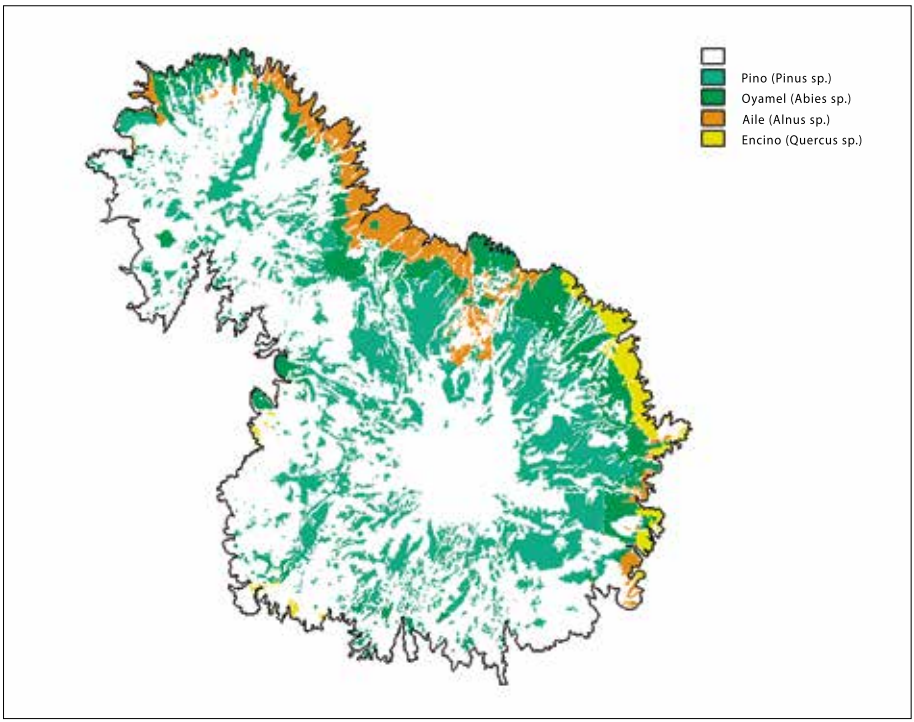


Figura 6. Zonas propuestas para la reintroducción de especies forestales nativas.

- la posibilidad de derivar nuevos criterios de análisis a partir de operaciones de análisis espacial.

A pesar de todo lo anterior, la aplicación SIG-EMC se ha caracterizado por una serie de dificultades, entre las que destacan: la definición de atributos y alternativas; la definición de pesos; la selección de métodos de combinación y la obtención de resultados.

La definición de atributos y alternativas

Hay una gran dificultad para realizar la exploración sistemática de la información espacial y, consecuentemente una carencia de capacidades analíticas y de modelado para generar el conjunto de alternativas de decisión. Existen serios inconvenientes para incluir en el análisis las preferencias del decisor, sobre todo en lo relacionado con las relaciones espaciales entre los objetos. Por estas razones, la mayoría de las aplicaciones de la EMC en el ambiente SIG resulta poco flexible y estática. En este

sentido, diversos autores coinciden en que los SIG incluyen solamente aquellos procedimientos de análisis y modelado de uso generalizado y, por consiguiente, no permiten estudiar los procesos internos de las variables geográficas.

La definición de pesos

La asignación de pesos es determinante en los procesos EMC. En efecto, a pesar de que su participación en el proceso afecta los resultados obtenidos, su aplicación suele ser poco clara. Es así como se soslaya su relación directa con los atributos y su papel transformador de la información geográfica de origen.

La selección de métodos de combinación y la obtención de resultados

Los métodos compensatorios suelen ser los métodos de combinación más utilizados en el ambiente SIG, en particular la combinación lineal ponderada. Éstos asumen que los atributos son independientes entre sí y tienden a negar la existencia de relaciones espaciales entre los atributos y las alternativas. Dentro de los supuestos de estos métodos está la necesidad de convertir los criterios a valores en escala de razón y de obtener valores cuantitativos para los pesos. Estas tareas son muy difíciles y no siempre reflejan con precisión las características del problema. A pesar de su aparente simplicidad, la combinación lineal ponderada de criterios continuos suele expresar una incertidumbre muy difícil de estimar. El análisis de proximidad a la solución ideal, por su parte, tiende a arrojar valoraciones distintas en función del método utilizado.

Finalmente, una vez realizada la combinación, es preciso ordenar las alternativas. Esto no necesariamente refleja la solución óptima dado que se asume una independencia estricta entre alternativas que interactúan espacialmente. Es preciso, por tanto, considerar la dependencia espacial de las variables.

Referencias

Barba-Romero, S. y J. Pomerol (1997), *Decisiones Multicriterio. Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica*, Colección Economía, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España.

Barredo, J. I. (1996), *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*, Ra-Ma, Madrid.

Bosque, J. (1997), *Sistemas de Información Geográfica*, Ediciones Rialp, 2ª. ed., Madrid.

Bosque, J. (2004), "El Uso de los SIG para localizar equipamientos e enstalaciones", en Bosque, J. y A. Moreno (coords.), *Sistemas de información geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, Ra-Ma Editorial, Madrid.

Eastman, J. (1993), *IDRISI, Versión 4.1, Update Manual*, Clark University, Worcester Mass.

Eastman, J., P. Kyem and J. Toledano (1993), "A procedure for multi-objective decision making in GIS under conditions of conflicting objectives", in *European Conference of Geographical Information Systems*, Munich, pp. 438-447.

FAO (1985), *Metodología de la Zonificación Agro-ecológicas*, Food and Agriculture Organization, FAO, Roma.

FAO (1997), *Zonificación Agro-ecológica. Guía general*, Food and Agriculture Organization, FAO, Roma.

Franco, S. (2003), *Sistema de información geográfica para la localización de residuos peligrosos*, UAEM, Toluca.

Franco, S., H. H. Regil y J. A. B. Ordóñez (2006), "Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca", en *Madera y Bosques*, 12(1), pp. 17-28.

Jankowski, P. (1995), "Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods", in *International Journal Geographical Information Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 251-273.

Jiang, H. and R. Eastman (2000), "Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS", in *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 14, no. 2, pp. 173-184.

Joerin, F., M. Thériault and A. Musy (2001), "Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment", in *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 15, no. 2, pp. 153-174.

Malczewski, J. (1999), *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, John Wiley & Sons, Inc. New York.

Malczewski, J. (2000), "On the use of weighted linear combination method in GIS: common and best practice approaches", in *Transactions in GIS*, 4(1). pp. 5-22.

Nyerges, T. (1993), "Understanding the Scope of GIS: its relationship to environmental modeling", in Goodchild, M., B. Parks and L. Steyert (comps.), *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, New York, pp. 75-93.

Regil, H. H. (2005), *Análisis del cambio de uso del suelo y vegetación para la obtención de la dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca, 1972-2000*, tesis de Licenciatura, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.

Saaty, T. (1997), "A scaling method for priorities in hierarquical structures", in *Journal of Mathematical Psychology*, no. 5, pp. 234-281.

Voogd, H. (1983), *Multicriteria evaluation of urban ad regional planning*, Pion, London.

Wood, L. and S. Dragicevic (2007), "GIS-based multicriteria evaluation and fuzzy sets to identify priority sites for marine protection", in *Biodiversity Conservation*, no. 16, pp. 2539-2558.

Capítulo 7. Análisis de cambio en la cobertura forestal en la Zona Núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, 2003-2006

José López García
Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México,

Introducción

En 1976 se reportó la existencia de colonias de mariposas monarcas en las montañas de México procedentes de Estados Unidos y Canadá, en los bosques de Oyamel, por lo que fue necesario establecer programas de protección para este proceso migratorio (Urquart, 1976). El 25 de mayo de 1980 se emite el decreto que protege a la mariposa monarca en todo el territorio nacional. Se establece por causa de utilidad pública, como zona de reserva y refugio de fauna silvestre, a los lugares donde la monarca hiberna y se reproduce (*Diario Oficial de la Federación*, 1980). En esta región se restringen las actividades de aprovechamiento en las temporadas de hibernación y se decretan como Áreas Naturales Protegidas a cinco santuarios entre los estados de México y Michoacán (*Diario Oficial de la Federación*, 1986), con una superficie de 16 110 ha, estableciéndose como Reserva Especial de la Biosfera Mariposa Monarca (REBMM), con actividades potenciales de aprovechamiento en la zona de amortiguamiento, que rodean a la zona núcleo. Posteriormente, en 1996, la REBMM fue categorizada como Área Natural Protegida de la Mariposa Monarca, por último en el 2000 se replantea la denominación y se amplía la superficie de protección (*Diario Oficial de la Federación*, 2000), como Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), con una superficie total de 56 259 ha, de las cuales 42 679 son Zona de Amortiguamiento y 13 580, Zona Núcleo.

La RBMM incluye los municipios de Temascalcingo, San Felipe del Progreso, Donato Guerra y Villa de Allende en el Estado de México y Coatepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Apoyo y Zitácuaro en Michoacán.

La RBMM en el Estado de México comprende una superficie de 16 309 ha, de los cuales 4 097 se consideran áreas núcleo. Las áreas de hibernación de la mariposa monarca se localizan dentro de un área natural protegida.

La RBMM está integrada por 93 predios: 59 ejidos, 13 comunidades indígenas y 21 pequeñas propiedades. Para la zona núcleo se tienen 21 ejidos, siete comunidades indígenas y tres pequeñas propiedades (SEMARNAT, 2001). Las coordenadas UTM extremas son: X min. 356200; X máx. 384000; Y min. 2135250; Y máx. 2211480.

Durante el 2000 el Fondo Mundial para la Conservación de la Vida Silvestre (WWF) creó la iniciativa del Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca (FCMM) que constituye una herramienta de gestión basada en el pago de servicios ambientales para aquellos propietarios que ante la nueva zonificación de la RBMM quedaron restringidos en cuanto a sus derechos de aprovechamiento, así como a los dueños de predios que aportan servicios de conservación. Este fondo es único en México y se realizó conjuntamente con una propuesta de ampliación del Área Natural Protegida (ANP). El capital del Fondo Monarca fue conferido por una fundación privada estadounidense, el gobierno federal mexicano y los gobiernos de los estados de México y Michoacán. El capital produce intereses que se canalizan a través de un Fideicomiso a los propietarios de la zona núcleo de la Reserva, que han cumplido con su compromiso de evitar la tala de árboles y que han participado en trabajos para la conservación de esta zona.

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca se ha visto afectada por la deforestación, la tala clandestina y el cambio de uso del suelo, esto ha propiciado que se establezcan medidas tendientes a reducir este impacto, para lo cual se estableció un sistema de apoyos económicos a través del Fondo Mexicano para la Conservación de la Mariposa Monarca (FCMM), dirigido a los permisionarios por no extraer árboles y a predios que realizan trabajos de conservación.

Métodos

Esta metodología es de carácter secuencial y se basa en la aplicación de técnicas geográficas con el siguiente orden: planeación del vuelo aéreo, para la toma de fotografías digitales (2003, 2005 y 2006); elaboración de un mosaico ortocorregido como línea de base, a partir de fotografías digitales del 2003; interpretación de fotografías aéreas digitales de 2003; fotointerpretación comparativa, 2003-2005 y 2005-2006; restitución por triangulación radial (pantalla plana de una computadora) al mosaico ortocorregido de los cambios 2003-2005 y 2005-2006; cruce

de mapas (2003-2005 y 2005-2006) con los predios forestales en el SIG ArcView; cálculo de las tasas de cambio y proyección e interpretación de resultados.

A. Planeación del vuelo aerofotográfico

Dado que el insumo para la evaluación del cambio en la densidad de cobertura forestal son las fotografías aéreas digitales en color, se realizaron anualmente vuelos aerofotográficos para cubrir la zona núcleo de la RBMM (Figura 1) en las siguientes fechas, el 22-23 de febrero de 2003, 10 de enero 2005 (80%), el 4 de abril de 2005 (20%) y 2-3 de marzo de 2006. Surgieron algunos contratiempos como son la disponibilidad de un avión adecuado que reuniera ciertas características, como altura de vuelo mínima de 5 500 m sobre el terreno, estructura en el fuselaje para colocar las cámaras fotográficas (color e infrarrojo cercano) y condiciones meteorológicas favorables para realizar el vuelo, como son con el mínimo de nubes y sin bruma.

El primer vuelo para la toma de fotografías aéreas digitales en esta zona fue realizado en 1999, para lo cual se elaboró un plan de vuelo que cubriera los requisitos de la fotogrametría convencional, como son la sobreposición lateral >30% y sobreposición longitudinal >60%, la primera para un cubrimiento total

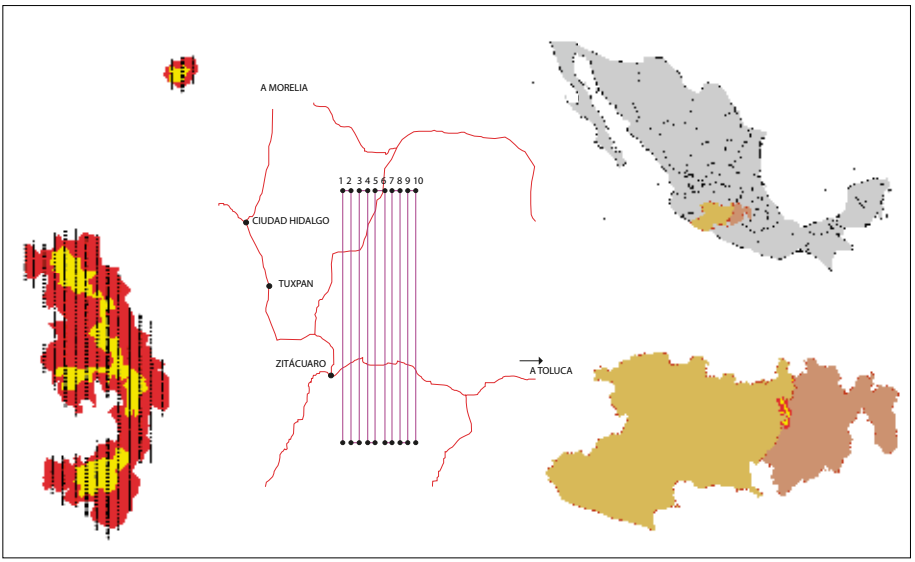


Figura 1. Polígono de la RBMM, los polígonos centrales son de zona núcleo y están rodeados por la zona de amortiguamiento. Ubicación del área en estudio entre los estados de México y Michoacán.

y la segunda para garantizar la visión estereoscópica. Los planes de vuelo para los siguientes años fueron realizados bajo las mismas condiciones, en general entre enero y marzo, con lo cual las líneas de vuelo se sobreponen, con la ventaja de poder hacer estereoscopia entre fotografías de diferente año (fotointerpretación comparativa), por tanto, es posible hacer fotointerpretación prospectiva y retrospectiva, utilizando el vuelo de 2003 como línea de base (Figura 2).

Para 2003 se utilizó una cámara fotográfica Nikon D1x digital profesional, para 2005 una cámara Kodak DCS y para 2006 una cámara Nikon D2x. El aumento de la resolución espacial está en función de la mejora tecnológica de las cámaras durante los últimos años, manifestada a través del aumento en el número de píxeles del sensor, en la sensibilidad, en la consistencia del color, en niveles de ruido más bajos y en el diseño optimizado de lentes y sitios fotosensibles en el sensor. Para una cobertura aproximada en el terreno de 1 700 x 1 140 m por imagen (m/píxel) de 0.6 m para 2003, y 0.4 para 2005 y 2006.

Las fotografías se van almacenando en el disco duro de una Lap Top que se encuentra acoplada con la cámara y que registra las coordenadas geográficas de cada escena mediante un sistema de posicionamiento global (GPS), para la correcta ubicación de las imágenes, elaborando un índice de vuelo, auxiliar en la construcción del mosaico fotográfico. Una vez realizado el vuelo, se hace un respaldo y con apoyo del software Adobe Photoshop, se procede a corregir las fotografías, rotando, si es necesario, para etiquetar al norte y renombrando las imágenes, se corrigen los niveles de ajuste, tonos, contraste y se imprimen a una escala promedio de 1:10 000, tomando como base la misma zona de los diferentes años, para el ajuste de escala, lo que garantiza una correcta fotointerpretación comparativa (Figura 3). Las fotografías fueron impresas a la escala 1:10 000, debido a que cubrían toda una hoja tamaño carta, ya que pueden ser impresas hasta 1:2 000 con muy buena resolución.

B. Mosaico ortocorregido como línea de base

Para el establecimiento de la línea de base fue necesario elaborar un mosaico ortocorregido a partir de fotografías aéreas digitales tomadas en 2003, con apoyo de ortofotos del 2001 (INEGI) y el modelo digital del terreno con curvas de nivel cada 20 m en NAD 27. El mosaico ortocorregido fue elaborado con ERDAS, utilizando fotografías aéreas digitales con un error medio cuadrático de 7 m. Fue utilizado como mapa base para transferir la información resultado de la fotointerpretación de 2003, 2005 y 2006, también sirvió de referencia cualitativa y visual del estado de la cubierta forestal en la zona núcleo de la RBMM. Para elaborar el mosaico fue necesario establecer puntos de control y puntos de amarre,

Fotografías tomadas el 22 de febrero de 2003

Fotografías tomadas el 10 de enero de 2005

Fotografías tomadas el 2 de marzo de 2006

Figura 2. Fotografías de zonas con cambios de diferentes años (2003, 2005 y 2006), con las que se realiza la fotointerpretación comparativa. El cubrimiento es similar pero existe paralaje y esto permite la observación estereoscópica.

esto se consigue usando como mapa base las ortofotos del 2001, considerando que tienen una resolución de 1 x 1 m de píxel y se van adhiriendo fotografías en forma individual, con lo que el error se reduce y las fotografías se van deformando, adquiriendo su posición correcta con los puntos de control. Las fotografías

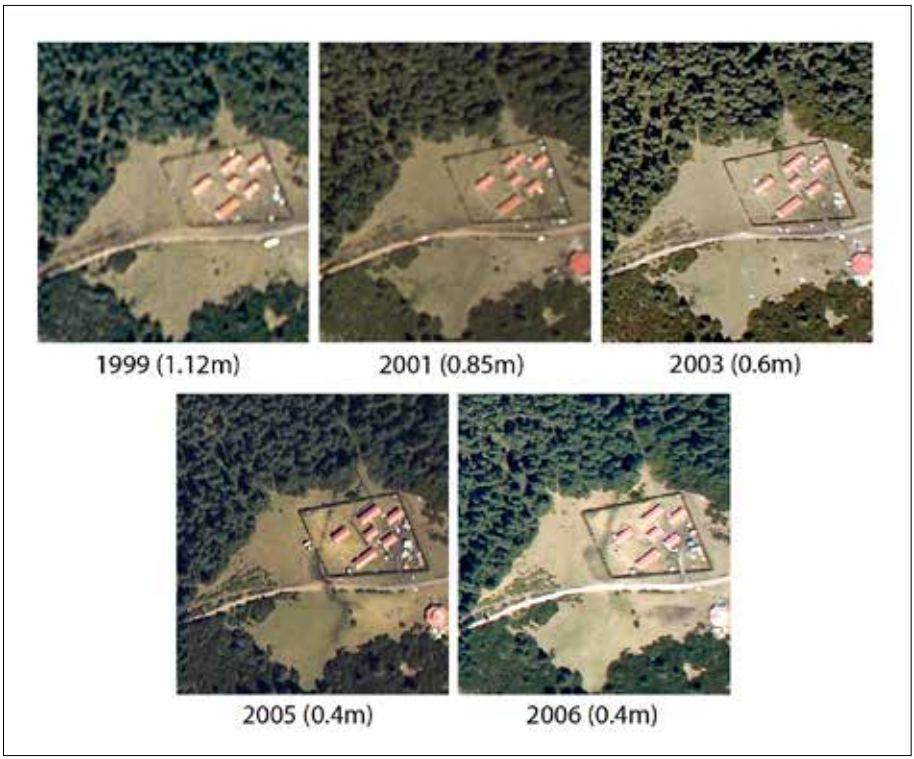


Figura 3. Secuencia fotográfica multitemporal. A partir de 0.60 m/píxel (imagen de 2003) pueden distinguirse inequívocamente árboles individuales y con 0.40 m/píxel se aprecia la estructura de los árboles individuales, árboles derribados, restos en sitios de corte de madera y senderos pequeños bajo el dosel vegetal.

deben ser corregidas en tono, contraste, color y brillo, para que al unirse no se noten las uniones de las fotografías.

El mosaico final se encuentra georreferenciado, con una resolución de 1 x 1 m por píxel, con la enorme ventaja que al sobreponerle las curvas de nivel, es un mapa base (ortofoto en color), con lo que es posible georreferenciar cualquier fotografía individual incluida en el mosaico, ya que el mosaico ofrece innumerables puntos de control. Por tanto, es un excelente mapa base e ideal para restituir la información interpretada en las fotografías aéreas con alta precisión.

C. Interpretación estereoscópica de fotografías aéreas digitales 2003

Esta fase se inicia con el acomodo y organización de las fotografías aéreas digitales impresas a escala 1:10 000 en papel. Con el apoyo del índice de vuelo las fotografías aéreas digitales se ordenan por líneas de vuelo y se separan las que están incluidas dentro de la zona núcleo, posteriormente para su interpretación con el estereoscopio se acomodan de norte a sur, después se procede a colocar un papel acetato transparente sobre las fotografías, unido con cinta adhesiva por la parte norte, lo que permite levantar el papel acetato si es necesario. El proceso de fotointerpretación se realiza de la siguiente forma:

a. Marcado de puntos principales y su transferencia estereoscópica a la siguiente fotografía a modo que cada una tenga tres puntos, a excepción de la primera fotografía de la línea y la última que sólo tendrán dos. Esto tiene la finalidad de acomodarlas siguiendo la línea de vuelo y orientarlas con el norte hacia el observador, para una correcta visión estereoscópica, emulando las condiciones en que fueron tomadas y evitando la pseudoesterecopía (visión estereoscópica invertida) y efecto de sombras encontradas (las sombras en el hemisferio norte siempre están hacia el norte, por tanto las sombras deben ir hacia el observador).

b. Trazado de áreas fotointerpretables por el método estereoscópico, que son las áreas de menor distorsión en la fotografía, teniendo en cuenta que es una proyección central. Considerando la sobreposición y los puntos principales se trazan líneas que forman un rectángulo, donde al observar estereoscópicamente se distingue una sola línea, cuando en realidad cada fotografía tiene una línea que delimita el área fotointerpretable y por tanto se tiene un cubrimiento total del área estudiada. Se utilizan marcadores indelebles para el trazado de líneas, es recomendable usar el color rojo para esta delimitación.

c. La fotointerpretación de 2003 se realizó primeramente separando las unidades de vegetación con diferentes coberturas arbóreas en las fotografías aéreas digitales y estableciendo los accesos para su verificación en campo, para lo cual fue necesario realizar muestreos de vegetación arbórea y comparar los datos de campo con los muestreos y definir bajo esta comprobación los cinco niveles de coberturas arbóreas: cerrada >80%; semicerrada 55-80%; 3 semiabierta 30-55%, abierta 5-30%, muy abierta <5%. Así como la separación de otras unidades que actualmente no tienen cobertura arbórea, consideradas como no forestales, denominadas como: áreas deforestadas, matorral, pastizal, agrícola e infraestructura,

pero que es necesario separar y tener una fotointerpretación completa de toda la zona núcleo.

Los pares estereoscópicos fueron interpretados considerando únicamente el área fotointerpretable y delimitando las unidades con un marcador indeleble de color rojo, así como sus claves que fueron numéricas, 1 para las cerradas, 2 para las semicerradas, 3 para las semiabertas, 4 para las abiertas y 5 para las muy abiertas. Para las unidades no forestales se usaron claves alfabéticas, D para deforestado, M para matorral, P para pastizal, A para agricultura y C para la infraestructura.

d. La revisión de la consistencia de unidades y claves se realizó una vez que se había terminado la interpretación aerofotográfica, revisando que no hubiera líneas sin cerrar, líneas separando dos unidades iguales, o bien que todos los polígonos estuvieran etiquetados. Se delimitaron zonas o polígonos en los que se tenían dudas o que la separación no estaba clara para su verificación en campo.

Aunque estas fotografías tienen una muy buena resolución (0.6 m), lográndose apreciar los elementos individuales, más aún, en tercera dimensión se aprecian hasta los tocones de áreas taladas y vehículos en los caminos, incluso así es necesaria la verificación de campo, ya que en algunas fotos el ángulo de toma o las sombras tienen un efecto que pudiera confundir al intérprete; en algunos casos se recurrió a la fotografía en formato digital y se le componía el color, brillo y contraste para una mayor seguridad.

D. Restitución por triangulación radial

La restitución es la transferencia de polígonos de fotointerpretación a un mapa base, pasando de una proyección central de la fotografía a una proyección ortogonal, esta operación normalmente se realiza con aparatos fotogramétricos como el Stereosketch, instrumentos de tercer orden, con el que fueron restituidas las fotografías interpretadas por los diferentes especialistas (geología, suelos y vegetación), después de la verificación de campo de toda la cartografía de México elaborada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

Como un aporte a los procesos de restitución se diseñó la transferencia de la información en digital, esta fase consistió en transferir en una pantalla plana de una computadora, la información de los acetatos producto de la interpretación de las fotografías aéreas digitales de 2003, escala 1:10 000 sobre el mosaico ortocorregido (elaborado a partir de fotografías aéreas digitales del 2003), igualando la escala promedio para cada fotografía y empleando el método de triangulación radial

(utiliza la propiedad de las fotografías aéreas verticales de que ángulos medidos con centro en el punto nadir, en la fotografía y en el terreno son idénticos), se basa en la ubicación de vértices de triángulos en las fotografías aéreas digitales y los mismos puntos en el mosaico fotográfico, de esta manera se transfiere la información contenida en cada triángulo y se corrige de esta forma la deformación de la fotografía y la diferencia de escala al unificarla con el mosaico ortocorregido. Esto se logra, ya que como el mosaico se despliega en ArcView, se ajusta la escala y se hacen coincidir los detalles de la fotografía a transferir con los rasgos del mosaico; como son del mismo año, es muy sencillo ubicar los detalles en el mosaico respecto a la fotografía, con lo cual este método es más preciso que la restitución convencional, ya que este último emplea un mapa base ampliado a la escala de las fotografías y sólo se aumenta el tamaño pero no la precisión, a diferencia con el método de usar el mosaico como mapa base (resolución 1 m por píxel). Todo el espacio del mosaico está ocupado por detalles fotográficos del terreno en forma georreferenciada y por tanto en una maqueta del terreno con gran potencial.

E. Fotointerpretación comparativa 2003–2005 y 2005-2006

La fotointerpretación comparativa consiste en formar un par estereoscópico con fotografías de diferente año, pero de la misma zona, para lo cual se utilizaron las mismas líneas de vuelo para los diferentes años, logrando que exista paralaje, condición para la estereoscopia. Además, las fotografías son impresas en papel a la misma escala (1:10 000), utilizando la misma zona para el cálculo de la escala, con lo cual se obtiene una escala promedio.

Una vez terminada la fotointerpretación, verificación de campo y restitución de 2003, se procedió a llevar a cabo la fotointerpretación comparativa. Tomando en cuenta que se utilizó el mismo plan de vuelo, o sea que la sobreposición de líneas es casi total entre los diferentes años, es posible realizar este procedimiento, para detectar las zonas de cambios. Esto se logra observando un par estereoscópico formado por una fotografía de 2003 y una de 2005 del mismo cubrimiento fotográfico, si no se observa la estereoscopia esto indica zonas de cambios, además que son muy evidentes a simple vista y por estereoscopía se obtiene la separación con mucha precisión. Utilizando la interpretación actualizada de 2005 se procede a realizar la comparación con las fotografías de 2006, siguiendo el mismo procedimiento que en el caso anterior, pero ahora se separan los cambios entre este periodo 2005-2006. Para facilitar los cambios en las fotografías de 2005 y 2006 se marcan en azul, con lo que son evidentes los cambios en éstas, mismos que fueron verificados en campo. Cabe aclarar que los segmentos de las fotogra-

fías de 2003 son transferidos por fotointerpretación a las fotografías de 2005 y los de 2005 a las de 2006, ambos en color rojo.

F. Restitución de los cambios 2003-2005 y 2005-2006

Esta fase consistió en hacer una copia de los segmentos de 2003 y transferir en pantalla los cambios detectados de la fotointerpretación comparativa 2003-2005 y 2005-2006, sobre el mosaico ortocorregido, igualando la escala promedio para cada fotografía y empleando el método de triangulación radial, con apoyo de los segmentos previamente transferidos. De esta forma se obtuvieron las zonas de cambios en estos periodos, previa verificación de campo. Esta información se pasó a polígonos para ser etiquetados, obteniéndose tres mapas de cobertura forestal (2003, 2005 y 2006).

G. Análisis comparativo 2003-2005 y 2005-2006

Cabe aclarar que este análisis abarca sólo la zona núcleo de la RBMM, por tanto, los mapas resultantes del proceso de restitución y el mapa de tenencia de la tierra fueron rasterizados a 3 m, obteniéndose mapas con el mismo cubrimiento y resolución. Con el apoyo de ArcView se realizaron las operaciones de mapas en dos partes. Primero se combinaron los mapas de cobertura forestal 2003-2005 y la tenencia. En segundo lugar los de cobertura forestal 2005-2006 y la tenencia, obteniéndose dos matrices de confusión, donde se aprecian los cambios por cada comparación de cobertura y además por tenencia, para cada uno de los periodos.

En los resultados de estas matrices de cambios se aprecian los polígonos que sufrieron algún cambio, los que no sufrieron cambio y por último aquéllos que son combinaciones ilógicas, resultado del cruce de mapas, pero que son defectos del sistema o errores en la definición de polígonos. Las matrices se obtienen en metros y son transformadas a hectáreas para su cuantificación, tanto a nivel de cambios por cobertura como por predio o por ejido.

Resultados de análisis 2003-2005 y 2005-2006

A. Cambios 2003-2005

Para este periodo de las 13 580 ha de la zona núcleo de la RBMM, 479.48 ha sufrieron algún tipo de modificación en su densidad de cubierta forestal, 13 096.91 ha no tuvieron cambios y por último los errores propios del sistema fueron de 2 556 m^2 (0.26 ha).

Como resultado de este análisis se obtiene una matriz de confusión en donde se establecen los cambios de una categoría a otra, en el eje de las Y, al final se

tiene el total de coberturas para 2005 y en el eje de las X, a la derecha, se aprecia el total de superficie original en 2003, la diferencia entre éstos son las hectáreas que fueron modificadas en el periodo y por tanto se puede obtener el impacto al paisaje en función del grado de afectación.

Las afectaciones más importantes a la cubierta forestal se dan en cinco predios, con modificaciones de más de 50 ha, con un total de 464.88 ha, que corresponden al 96.97% de la zona núcleo, el restante se divide en cuatro predios con superficies de menos de 7%. Los ejidos con mayor impacto fueron Nicolás Romero, Crescencio Morales, Francisco Serrato, Propiedad Federal y Ampliación La Mesa (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de confusión del cambio de densidad de cobertura forestal en los periodos 2003-2005 y 2005-2006

Matriz de confusión de las coberturas forestales 2003-2005 y 2005-2006 en zona núcleo de la RBMM									
Coberturas 2003-2005 y 2005-2006 (ha)		Cerrada	Semicerrada	Semiabierta	Abierta	Muy abierta	Deforestado	No forestal	Total 2003 y Total 2005
COBERTURAS 2003-2005	Cerrada	5 491	71	149	39	80	32	4	5 826
	Semicerrada	0	2 493	63	29	17	15	4	2 608
	Semiabierta	0	0	1 616	29	31	32	3	1 723
	Abierta	0	0	0	871	55	30	2	965
	Muy abierta	0	0	0	0	666	34	1	712
	Deforestado	0	0	0	0	0	992	1	999
	No forestal	0	0	0	0	0	0	720	720
	Total 2005	5 491	2 564	1 828	968	859	1 134	735	13 580
COBERTURAS 2005-2006	Cerrada	5 273	47	66	44	45	17	0	5 491
	Semicerrada	2	2 437	41	45	29	11	0	2 564
	Semiabierta	0	0	1 687	52	80	9	0	1 828
	Abierta	0	0	0	914	46	8	0	968
	Muy abierta	0	0	0	0	820	38	0	859
	Deforestado	0	0	0	0	0	1 134	0	1 134
	No forestal	0	0	0	0	0	0	735	735
	Total 2006	5 275	2 484	1 795	1 054	1 021	1 216	7 35	13 580

B. Cambios 2005-2006

La matriz de confusión para este periodo de un año manifiesta que los cambios se aceleraron y fueron mucho más severos (Tabla 2), más aún que hubo reincidencia en cuatro de los cinco predios del periodo anterior, se dio el mayor cambio en la cobertura forestal, a excepción de la Propiedad Federal que no sufrió modificaciones. La superficie afectada en este periodo fue de 577 ha, que corresponde al 4.25% de la zona núcleo. Cuatro predios cubren el 92.73% del área afectada, pero lo más alarmante es que el 90.62% de esta superficie corresponde a dos ejidos, Crescencio Morales con 427.22 ha y Nicolás Romero con 95.05 ha, lo que equivale a 74.13 y 16.49%, respectivamente, de la zona alterada.

Tabla 2. Cambios en la densidad de cobertura forestal en la zona núcleo de la RBMM en los periodos 2003-2005 y 2005-2006

Tipo de cambio en la densidad de cobertura forestal en la zona núcleo de la RBMM					
Cobertura inicial	Cobertura final	2003 - 2005		2005 - 2006	
		ha	%	ha	%
Cerrada	Semicerrada	48	10	47	8
Cerrada	Semiabierta	56	12	66	11
Cerrada	Abierta	30	6	44	8
Cerrada	Muy abierta	26	6	45	8
Cerrada	Deforestado	31	6	17	3
Semicerrada	Semiabierta	51	11	41	7
Semicerrada	Abierta	23	5	45	8
Semicerrada	Muy abierta	12	3	29	5
Semicerrada	Deforestado	14	3	11	2
Semiabierta	Abierta	26	5	52	9
Semiabierta	Muy abierta	28	6	80	14
Semiabierta	Deforestado	30	6	9	2
Abierta	Muy abierta	43	9	46	8
Abierta	Deforestado	29	6	8	1
Muy abierta	Deforestado	32	7	38	7
Total		480	100	577	100

C. Tasas de cambio 2003-2005 y 2005-2006

Al analizar las tasas de cambio por tipo de cobertura se aprecia que para el primer periodo de 2003-2005, las coberturas cerradas (>80%) son las que se pueden considerar como bosques conservados, y que se redujeron a una tasa de 2.92%; para los bosques semialterados se consideró a las coberturas semicerradas (50-80%) y las semiabiertas (30-50%), con una tasa de cambio de 0.70 de incremento; por último las superficies alteradas, que incluyen densidades de cobertura abierta (5-30%) y muy abierta (<5%), incluyen además las zonas sin cubierta forestal (zonas deforestadas, agricultura, pastizal, infraestructura), con una tasa de incremento de 4.34 anual (Tabla 3).

Se aprecia un incremento considerable para el segundo periodo de 2005-2006. Las superficies conservadas se redujeron a una tasa de 3.94 anual; las superficies semialteradas también sufrieron una disminución con una tasa de 2.58; por último, las zonas alteradas se incrementaron considerablemente a una tasa anual de 8.93 (Tabla 3). Se aprecia un incremento de las áreas con menor cobertura forestal y por tanto con la modificación de los paisajes tiende a la degradación y reducción de la capacidad de recarga de acuíferos y aumento de los procesos erosivos.

D. Proyección a 2050

De acuerdo con las matrices de confusión, y con las tasas de cambio para cada periodo evaluado, se aprecia que la tendencia es a un aumento constante de las superficies alteradas y una disminución de las superficies conservadas, al compararla con los datos reportados por Brower *et al.*, 2002, las tasas de cambio para

Tabla 3. Tasa anual (porcentaje por año), en los diferentes estados de conservación de la zona núcleo de la RBMM

Tasa de cambio en la zona núcleo de la RBMM			
Periodo	Conservado 5 826 ha	Semialterado 4 331 ha	Alterado 3 395 ha
2003-2005	-2.92	0.70	4.34
2005-2006	-3.94	-2.58	8.93
2003-2006	-3.26	-0.41	5.85

Conservado = Cobertura cerrada (> 80%).
Semialterado = Cobertura Semicerrada (55-80%) y semiabierta (30-55%).
Alterado = Cobertura abierta (5-30%) y muy abierta (< 5%).

esta región entre 1971-1984 y 1984-1999, se aprecia que los cambios reportados van en constante aumento y que sus estimaciones con tasas de 1.70 y 2.41, respectivamente, fueron superadas por la tasa de 2.92 para el periodo 2003-2005 y de 3.94% para el segundo periodo de 2005-2006. Se realizó la proyección para la zona núcleo, que en 2006 ostenta una superficie conservada de 5 275 ha (coberturas cerradas), estimado para 2010, 4 491 ha; para 2020, 3 005 ha; para 2030, 2 010 ha; para 2040, 1 345 ha, y para 2050 habrá 900 ha (Figura 4).

Discusión

La superficie analizada por Brower *et al.* (2002), en la región de la Mariposa Monarca abarcó 42 020 ha, con una tasa de cambio negativa de 2.08 entre 1971-1999, siendo la tasa entre 1971-1984 de -1.7, para incrementarse en el periodo 1984-1999 a -2.41. La zona núcleo queda incluida dentro de esta región y por tanto, se hace la comparación de los datos, luego de hacer una agrupación de los tipos de coberturas por grado de conservación, para su adecuada comparación y se aprecia que la tasa se incrementó a -3.26 entre 2003 y 2006, siendo más severa en el periodo de 2005-2006, con una tasa de -3.94, lo que casi duplica la tasa

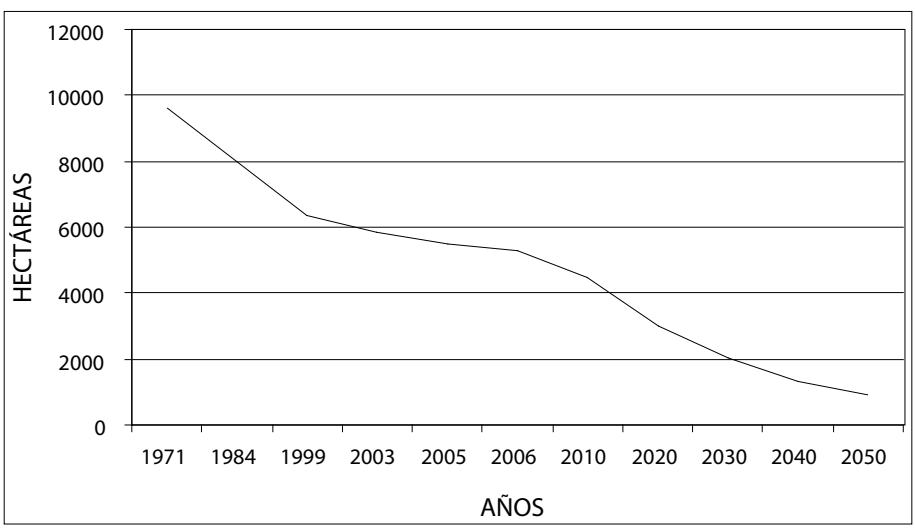


Figura 4. Dinámica de la pérdida de la cobertura cerrada de 1971 a 2050, de las 9 550 ha de bosques conservados en la zona núcleo en 1971, hay 5 275 en 2006 y se estima, bajo la misma tasa de 3.94% anual, que reduzca a 900 ha en el 2050.

de 1971-1999. Se reduce la superficie conservada y a la vez se incrementan las superficies alteradas, así como la tasa de cambio. Lo que resulta más alarmante es que se trata de un Área Natural Protegida, con programas de pago por servicios ambientales, pero más grave aún, es que sea la zona núcleo de una Reserva de la Biosfera reconocida internacionalmente.

Conclusión

Con el uso de fotografías digitales en color de alta resolución, aunado a la mejora en las técnicas de fotointerpretación y restitución fue posible realizar este trabajo, que permitió evaluar el cambio en la densidad de cobertura forestal, con apoyo del SIG ArcView. Los resultados obtenidos permitieron al Fondo Monarca establecer el pago por servicios ambientales y de conservación, de los predios que participan en este programa. Los datos de cambio de la densidad de cobertura forestal son drásticos y denotan que se requiere tomar medidas más severas para la protección de estos recursos naturales, ya que no sólo se verán afectadas las masas boscosas, sino también los suelos, que aportan cantidades importantes a la captura de carbono y a la recarga de acuíferos. Con esta información es posible establecer programas encaminados a la restauración, ya que se tienen localizadas las áreas afectadas.

Referencias

Brower, L. P., G. Castilleja, A. Peralta, J. López-García, L. Bojórquez-Tapia, S. Díaz, D. Marmolejo and M. Missrie (2002), "Quantitative changes in forest quality in a principal overwintering area of the Monarch Butterfly in Mexico, 1971-1999", *Conservation Biology*, no. 2, pp. 346-359.

Diario Oficial de la Federación (1980), "Decreto que declara zonas de reserva y refugio silvestre, lugares donde la mariposa inverna y se reproduce", Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, 9 de abril 1980, México.

Diario Oficial de la Federación (1986), "Decreto que declara áreas naturales protegidas para fines de migración, hibernación y reproducción de la Mariposa Monarca", Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, jueves 9 de octubre de 1986, 398(27), México, pp. 33-41. 27.

Diario Oficial de la Federación (2000), "Decreto de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM)", Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, 10 de noviembre de 2000, México.

SEMARNAT (2001), *Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México.

Urquart, F. A. (1976), "Found at last: the monarch's winter home", *National Geographic*, no. 150, pp. 160-173.

Capítulo 8. Estudio de cambio de uso del suelo como insumo al ordenamiento territorial de la Zona V Norte petrolera del estado de Chiapas

Gabriela Gómez Rodríguez
Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE)
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Omar Rojas García
Posgrado de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras
adscrito al Instituo de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

La modificación del uso del suelo debido a las actividades humanas ha provocado una pérdida generalizada de la biodiversidad mundial, a través de los procesos de degradación ambiental (Ochoa y González, 2000), así como la intensificación del uso del terreno (Lambin, 1997) que induce la pérdida y degradación del suelo, cambios en el microclima, y afectaciones en cuencas hidrográficas y asentamientos humanos (Bocco *et al.*, 2001).

En México, los bosques y selvas en su conjunto comprenden los ecosistemas dominantes, geográficamente hablando (cubriendo un 32.75% de la superficie del país; Palacio *et al.,* 2000) y proporcionan asimismo (a diferencia de otros ecosistemas terrestres) una gran variedad y numerosos servicios ambientales (Daily, 1997). Sin embargo, el Inventario Nacional Forestal 2000 estimó para el periodo de 1976 a 2000 una tasa de deforestación a nivel nacional de 0.25%, mientras que para el trópico ésta se elevó a 0.76 % (Velázquez *et al.,* 2002).

Como agravante de la deforestación, se reconoce el papel de la fragmentación y la degradación del hábitat como responsables de cambios en la estructura y función de los ecosistemas (Saunders *et al.*, 1991). La fragmentación provoca una disminución del tamaño medio de los parches de hábitat y los aísla. La degradación del hábitat, por el contrario, no implica un cambio en la utilización del terreno, pero es también un problema grave en los trópicos.

Las principales causas de degradación en México son el cambio de uso del suelo hacia la agricultura y el sobrepastoreo (ambas con 17.5%). La deforestación ocupa el tercer lugar con 7.4%, seguida de la urbanización (1.5%). Todos estos procesos tienen que ver con la reducción de la cubierta vegetal, responsable de la conservación del suelo. En el decenio de 1993 a 2003, la superficie agrícola creció 8.5%, agravando los procesos de degradación. La superficie ganadera con sobrepastoreo correspondió al 24% de la superficie nacional (SEMARNAT, 2005).

La transformación de la vegetación hacia actividades agropecuarias es siempre más intensa si se trata de vegetación secundaria que de primaria. Este fenómeno de una primera degradación o alteración de la vegetación seguida por la eventual transformación a otros usos del suelo es, sin duda, responsable en gran medida de la elevada tasa de pérdida de la vegetación natural que se experimenta en México (*Ibid.*).

Ante esta problemática, es imperativo identificar cuáles son las causas que originan el deterioro de los recursos naturales y, así mismo, tener el conocimiento de los servicios ambientales[1] que nos brindan estos recursos, para proponer así estrategias de aprovechamiento sustentable. En otras palabras, la comprensión de la dinámica de los recursos disponibles en cuanto a su ubicación, calidad, abundancia, fragilidad y riesgo, es la base para poder planificar su aprovechamiento a través del tiempo, sin comprometer su disponibilidad para las generaciones futuras. Si no se consideran estos elementos, difícilmente será posible orientar algún plan de aprovechamiento, conservación y protección.

La política ambiental mexicana reconoce que el territorio no es sólo un espacio físico en donde confluyen los recursos naturales, sino un ensamble de ecosistemas articulados históricamente a las actividades humanas, en donde a toda transformación o cambio social relevante corresponden significativas modificaciones ecológicas (Toledo *et al.*, 2002).

Por ello, el Ordenamiento Ecológico del Territorio (OET) surge como un proceso y una estrategia de planificación, de carácter técnico-político, con el que se pretende configurar, en el largo plazo, una organización del uso y la ocupación del territorio, acorde con las potencialidades y limitaciones del mismo, las

[1] Aquéllos que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio del manejo sustentable de los recursos forestales, tales como la provisión del agua en calidad y cantidad; la captura de carbono, de contaminantes y componentes naturales; la generación de oxígeno; el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales; la modulación o regulación climática; la protección de la biodiversidad, de los ecosistemas y formas de vida; la protección y recuperación de suelos; el paisaje y la recreación, entre otros (Capítulo II. ARTÍCULO 7, XXXVII, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable).

expectativas y aspiraciones de la población y los objetivos sectoriales de desarrollo (económicos, sociales, urbano-regionales y ecológicos; Massiris, 2001).

El OET debe concebirse como un proceso que debe ser permanente y continuo. Los territorios no son, de ninguna manera, estáticos, sino por el contrario, dinámicos, y en la medida de ese dinamismo debe contemplarse la constante renovación de las acciones a tomarse en cada entidad estatal en materia de ordenamiento (Sánchez y Palacio, 2004).

Una de las premisas para plantear una propuesta de OET es el estudio y evaluación de cambios del espacio geográfico, elementos necesarios para la planeación del uso de la tierra y el ordenamiento del territorio (Tricart y Kilian, 1982). En el caso específico de las áreas destinadas a la conservación de los recursos naturales, es decir, las reservas biológicas, los estudios geográficos y cartográficos permiten reconocer el espacio con distintos niveles de aproximación y detalle, para lo cual es necesario hacer uso de diferentes escalas y herramientas, a fin de construir modelos cartográficos (*Ibid.*). Así mismo, el proceso de OET requiere de la disponibilidad y manejo de gran cantidad de información especializada, sistematizada y de buena calidad, que pueda ser organizada en bases de datos que se integren a un SIG para hacer eficiente su almacenamiento, procesamiento, análisis y síntesis con fines de planeación.

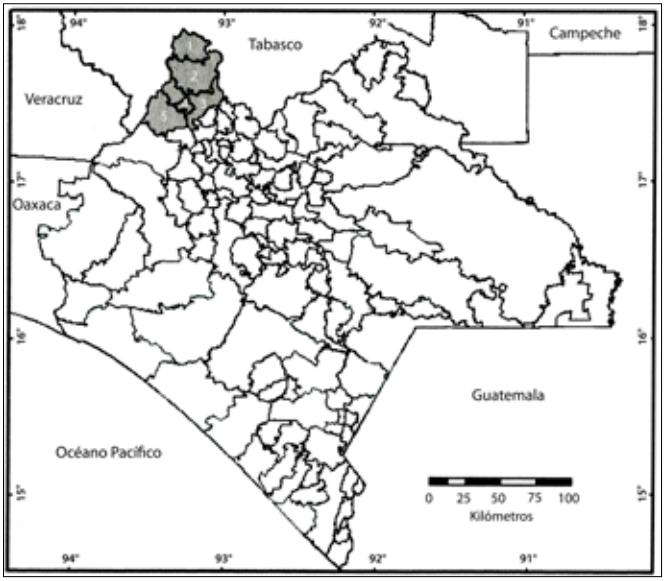
Descripción de la problemática de la Zona V Norte petrolera del estado de Chiapas

La región V Norte está integrada por 23 municipios, con una superficie de 6 098.5 km^2, equivalente al 8% del territorio estatal de Chiapas. La cabecera se localiza en la ciudad de Pichucalco, con una población de 324 273 habitantes para 8.27% del total estatal. Cabe destacar que un 44.1% de la población regional se concentra en los municipios de Reforma, Simojovel, Pichucalco, Pueblo Nuevo Solistahuacán y Bochil (Figura 1).

De esta región económica de Chiapas, se involucran cinco municipios para la Zona V Norte petrolera: Pichucalco, Ostuacan, Reforma, Juárez y Sunuapa.

La zona en estudio posee un potencial natural diversificado en cuanto a recursos naturales (suelos con potencial agrícola, pastizales, bosques, cuerpos de agua, corrientes permanentes importantes, recursos energéticos y minerales).

Originalmente, la base económica fue principalmente agrícola. A partir de los años setenta la actividad ganadera invadió los espacios agrícolas y la cobertura vegetal natural de las zonas tropicales. En una tercera etapa experimentó el



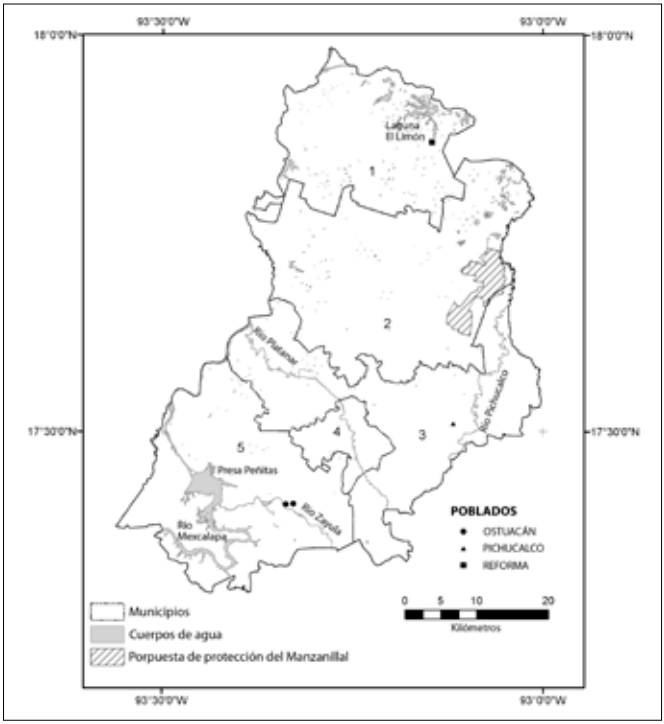


Figura 1. Área en estudio en el noroeste del estado de Chiapas. Municipios involucrados:
1. Reforma,
2. Juárez,
3. Pichucalco,
4. Sunuapa y
5. Ostuacán.

auge y la expansión de la industria petrolera (particularmente por PEMEX) sobre su territorio, en las fases de extracción de hidrocarburos y procesamiento de gas natural, la cual sigue siendo el puntal de su economía. La agricultura y la ganadería continúan siendo actividades económicas importantes. Pero la industria petrolera es la base económica de la región y se encuentra presente a través de impactos[2] de diversa índole en todo el territorio, en la dinámica regional y en la vida cotidiana de sus habitantes. Sin embargo, su notoria presencia no ha permeado en el bienestar social y económico general de la región. Sus tres localidades más importantes, Reforma, Pichucalco y Juárez, ejercen cierto grado de centralidad sobre el resto de la región, sin embargo, ésta gravita más bien en torno a las ciudades más cercanas del estado de Tabasco, como Teapa y Villahermosa.

A raíz de las denuncias que en 1988 el Gobierno del Estado ha recibido, relacionadas a afectaciones de PEMEX, se solicitó a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto Politécnico Nacional (IPN) se hicieran estudios de contaminación del agua. Los estudios demostraron contaminación en agua y sedimentos, sin embargo, Petróleos Mexicanos (PEMEX) nunca quiso hacerse responsable.[3] Con base en los resultados alcanzados, en diciembre del 2003 se creó la Comisión Interinstitucional para la Atención de la Problemática Ambiental de las Zonas Petroleras del Estado por Acuerdo del Titular del poder Ejecutivo del Estado.

El Gobierno del Estado de Chiapas, a través del Instituto de Historia Natural y Ecología (IHNE), decidió promover una propuesta para la realización de un Ordenamiento Ecológico Territorial, como base para la planeación del desarrollo integral y sustentable de la Zona en la Región V Norte petrolera del estado de Chiapas. Dicha propuesta devino de la necesidad identificada por la Comisión Interinstitucional para la Atención de la Problemática Ambiental de las Zonas Petroleras del Estado. Por ello, y para atender cabalmente con esta prioridad, el IHNE solicitó a la UNAM, a través del Instituto de Geografía (IGg), emprender las acciones necesarias para la realización de dicho ordenamiento.

---

[2] Entendiéndose impacto como la "alteración" que se produce en el ambiente cuando se lleva a cabo un proyecto o una actividad.

[3] Información obtenida de la página de Internet del Instituto de Historia Natural y Ecología del Estado de Chipas, Dirección de Protección Ambiental [http://www.ihne.chiapas.gob.mx/ecologia/cuencas.asp].

Detección de cambio

Una importante área de investigación ha sido la detección de cambio que analiza las diferencias en la cobertura vegetal y en el uso del suelo a través del tiempo. Las técnicas de detección de cambio utilizan las imágenes de satélite como un insumo principal, se basan en el supuesto de que cualquier transformación en la cobertura resultará en alteraciones en los valores de reflectancia lo suficientemente grandes para ser registradas. Para el análisis de este fenómeno debe buscarse que las imágenes tengan condiciones atmosféricas, de ángulo solar y humedad del suelo similares (Singh, 1989).

Dentro de estos análisis se tienen, entre otros, la diferencia de índices de vegetación; en este método, empleado frecuentemente para detectar cambios en la cobertura. La fórmula de este índice puede diferir, pero el supuesto básico es la absorción de la energía en el espectro visible y la gran reflectividad en el infrarrojo por parte de la vegetación. Numerosos estudios han demostrado la fuerte correlación de la biomasa vegetal y dichos índices (Anderson *et al.*, 1993).

La productividad primaria neta (PPN) es el balance entre la fijación del carbono vía fotosíntesis y la pérdida de carbono debido a la respiración y, por tanto, representa el carbón almacenado en la vegetación. La estimación de la PPN tiene aplicaciones para estimar la disponibilidad de hábitats naturales, la asimilación del bióxido de carbono terrestre y constituye un parámetro integrador del funcionamiento de los ecosistemas a gran escala. La variabilidad espacial y temporal puede sugerir diferencias en la capacidad de secuestro de CO2 y es un indicador de la respuesta de la vegetación a cambios climáticos globales.

Diversos estudios han sugerido la existencia de una relación entre el índice de vegetación normalizado (NDVI), obtenido a partir de las imágenes de satélite y la PPN anual para diferentes ecosistemas en amplias zonas geográficas (Gómez-Mendoza *et al.*, 2006). El NDVI tiene una relación lineal con la fracción fotosintéticamente activa de la copa de los árboles. En consecuencia, el análisis del NDVI es de gran utilidad en estudios de variaciones espaciales y temporales, así como la respuesta de la vegetación y la PPN a la variabilidad climática a escalas regionales.

Una vez obtenida la imagen de cambio, producto de la resta del NDVI de dos imágenes consecutivas, se deberá decidir cómo separar los píxeles de cambio, del resto del área. Por ejemplo, en el caso de una resta de imágenes los píxeles de no cambio tendrán valores cercanos a cero, por el contrario, los de cambio poseerán valores absolutos grandes. Es ahí donde el analista deberá decidir un valor umbral por encima del cual considerará que ha habido alguna transformación. En sistemas

biológicos la situación es compleja, ya que el cambio es una característica intrínseca y natural (Botkin *et al.*, 1989). Fung y LeDrew (1988), entre otros, han tratado de encontrar el valor umbral óptimo. Ellos llegan a la conclusión que de acuerdo con la técnica usada será el tipo de cambio encontrado. Por ejemplo, transformaciones de zonas rurales a urbanas, la resta de bandas 2 en MSS es adecuada.

El siguiente problema después de encontrar las zonas donde el cambio ha ocurrido, es definir hasta qué punto no es debido a la dinámica intrínseca del sistema que pueda llevar a condiciones menos productivas. Es ahí donde el uso de otro tipo de información de respaldo nos podrá indicar la importancia de acuerdo con la ubicación espacial del cambio (Gómez, 1997).

En general los estudios de detección de cambio para ordenamiento territorial en México han empleado fuentes existentes, tales como mapas de INEGI, series 1 a 3, y/o los inventarios forestales de 1994 y 2000 (Palacio *et al.*, 2000). Velázquez y colaboradores publican en 2003 un estudio donde ocupan mapas de cobertura vegetal, realizados en previas investigaciones, superpuestos sobre imágenes LANSTAT ETM+ y con 300 puntos de muestreo, para detectar cambios en el uso del suelo en el estado de Oaxaca, los cuales cuantificaron y mapearon.

Objetivos

Evaluar la situación actual de la cobertura vegetal en la zona como parte de los insumos indispensables para el ordenamiento ecológico territorial.

Realizar un análisis detallado de los cambios que se han operado en los últimos 18 años por medio de las imágenes de satélite del tipo Landsat, fotografías aéreas y trabajo de campo.

Metodología

1. Obtención de imágenes de satélite de la zona. Para esta parte del estudio se emplearon dos imágenes: Landsat TM de 1986 (03/11/86) y Landsat ETM+ del 2002 (08/10/2002).
2. Integración de la información. Las imágenes fueron importadas al sistema de procesamiento digital de imágenes ENVI, reproyectadas para ajustarse a los parámetros de la proyección Universal transversa de Mercator (UTM) zona 14 y cortadas de acuerdo con los límites de la Región V Norte.

3. Elaboración e impresión de compuestos en falso color de la zona para guía en trabajo de campo.
4. Reconocimiento de la zona mediante el análisis cualitativo de las imágenes con el objetivo de la planeación del trabajo de campo.
5. Trabajo de campo. Se visitó la zona en estudio del 20 al 25 de noviembre de 2005. Para este trabajo se procuró registrar la información de las diferentes cubiertas vegetales: ubicación geográfica (mediante el uso de coordenadas obtenidas del sistema GPS), características y fotografía digital. Se obtuvieron 35 puntos de control. Se contó adicionalmente con otros 35 puntos de campo colectados por el Instituto de Historia Natural de Chiapas, los cuales fueron obtenidos siguiendo la misma metodología.
6. Procesamiento digital de las imágenes Landsat en el programa ENVI 3.6. Mediante el método de componentes principales, que permite extraer la mayor varianza de la imagen, se obtuvo un primer producto para interpretación. Al resultante de los componentes principales se le aplicó una clasificación no supervisada para obtener agrupaciones de coberturas similares. Este método produjo 30 clases que fueron revisadas para su etiquetación. La ventaja de este método es que permite, para la zona, tener una idea de la diversidad de la cobertura vegetal, aun dentro del mismo uso del suelo. El ejemplo más claro lo constituyen los potreros, donde dependiendo del paisaje será la cobertura arbórea remanente, es decir, en las zonas más planas del Norte las extensiones de pasto son mucho mayores, a expensas de cobertura arbórea. Por el contrario, hacia el sur, los potreros son de menores tamaños y más aislados, permitiendo la existencia de manchones de selva alta perennifolia (con alta perturbación). Del mismo modo existen potreros en diferentes condiciones de humedad, las zonas inundadas al momento de la toma de la imagen son fácilmente identificables. Por otra parte, algunas cubiertas se confunden y deben ser diferenciadas siguiendo algún otro criterio. Ejemplo de ello son las zonas de suelo desnudo, que desde el punto de vista espectral, son muy semejantes, pero en algunos casos son zonas aluviales adyacentes a los cauces de los ríos y en otras son zonas urbanas o instalaciones petroleras.
7. Etiquetación. Las imágenes se importaron en el SIG Arc/Info workstation. En el proceso se tomaron en cuenta los puntos de control obtenidos en campo, las ortofotos digitales, modelo de elevación del terreno, mapa de pendientes y otro tipo de información cartográfica como el mapa de uso de suelo y vegetación del Inventario Forestal Nacional 2000-2001.

8. Generalización. En Arc/Info workstation se aplicó un método de limpieza de bordes en el mapa raster para eliminar píxeles aislados.
9. Cálculo de índices de vegetación normalizados (NDVI). Para las imágenes de 1986 y 2002, mediante la fórmula:

$$NDVI = (IR - VIS) / (IR + VIS) ,$$

donde, VIS = Banda 3 (visible),
IR = Banda 4 (infrarrojo cercano).

10. Resta de NDVI. Para la zona estudiada se adecuaron valores de alrededor de una desviación estándar respecto a la media de los datos digitales resultantes. De acuerdo con sus desviaciones estándar respecto a la media, se clasificaron en siete zonas de cambio, de acuerdo con el Cuadro 1.
11. Análisis de los datos de las coberturas de 1986 y 2002, junto con los datos de las zonas de cambio para obtener los datos estadísticos de la dirección de dichos cambios.

Resultados

Estado actual del uso de suelo en la Región V Norte de Chiapas

A partir de la interpretación de la imagen de 2002, en conjunto con la información de campo y las ortofotos, que nos da la posibilidad de un nivel de detalle aproximado a la escala de 1:100 000, se identificaron 13 clases de uso de suelo

Cuadro 1. Valores correspondientes a las siete zonas de cambio

Desviación estándar respecto a la media	Valores (promedio 5.91, δ 0.80	Categoría
Más de 3 δ	Mayores 8.34	Fuerte incremento
Entre 3 δ y 2 δ	7.53 a 8.33	Incremento moderado
Entre 2 δ y 1 δ	6.73 a 7.52	Ligero incremento
Entre 1 δv – 1 δ	5.11 a 6.72	Sin cambio
Entre -1 δ v -2 δ	4.30 a 5.10	Ligero decremento
Entre -2 δ v -3 δ	3.49 a 4.29	Decremento moderado
Menos -3 δ	Menos de 3.48	Fuerte decremento

y vegetación, cuya distribución, en porcentaje, se indica en el Cuadro 2. Dichas clases se han reagrupado en ocho diferentes usos del suelo y vegetación para la descripción, que a continuación se presenta: en la Figura 2 se presenta una serie de mapas con la distribución de los principales tipos de vegetación y uso del suelo.

1. Uso Pecuario (Figura 2a) El uso del suelo predominante en la zona es ganadero, con potreros en diferentes condiciones que, en total, abarca un 36.6% del territorio aproximadamente (Cuadro 2). Hacia el norte los potreros son extensos y con poca cubierta arbórea. Conforme se recorre la zona hacia el sur, comienzan zonas de lomeríos bajos, donde los potreros son de dimensiones menores y la cubierta forestal remanente es más abundante. Al sur, en las inmediaciones del Volcán Chichonal, se encuentran pequeños potreros, algunos en pendientes pronunciadas rodeados de selva alta con alto grado de perturbación o plantaciones de cacao o hule.

   Miranda (1952) reporta que las sabanas cubren grandes extensiones en las llanuras del norte del Chiapas, donde una cierta parte de ellas ha sido claramente originada por la acción del hombre y el pastoreo. De las

Cuadro 2. Superficie por tipo de uso de suelo y vegetación

Clase	Hectáreas	Porcentaje
Agua	11 113	4.55
Depósito aluvial	618	0.25
Humedales (polar-tular)	30 710	12.56
Pastizal inducido	1 744	0.71
Plantaciones (naranjos)	1 531	0.63
Plantaciones (platanares)	9 059	3.71
Potreros baja cobertura	35 506	14.52
Potreros en zonas inundables	54 022	22.10
Selva alta perennifolia	12 766	5.22
Selva alta perennifolia con vegetación secundaria	66 269	27.11
Selvia mediana perennifolia inundable (de canacoíte)	5 141	2.10
Suelo desnudo	13 752	5.63
Urbano	2 228	0.91

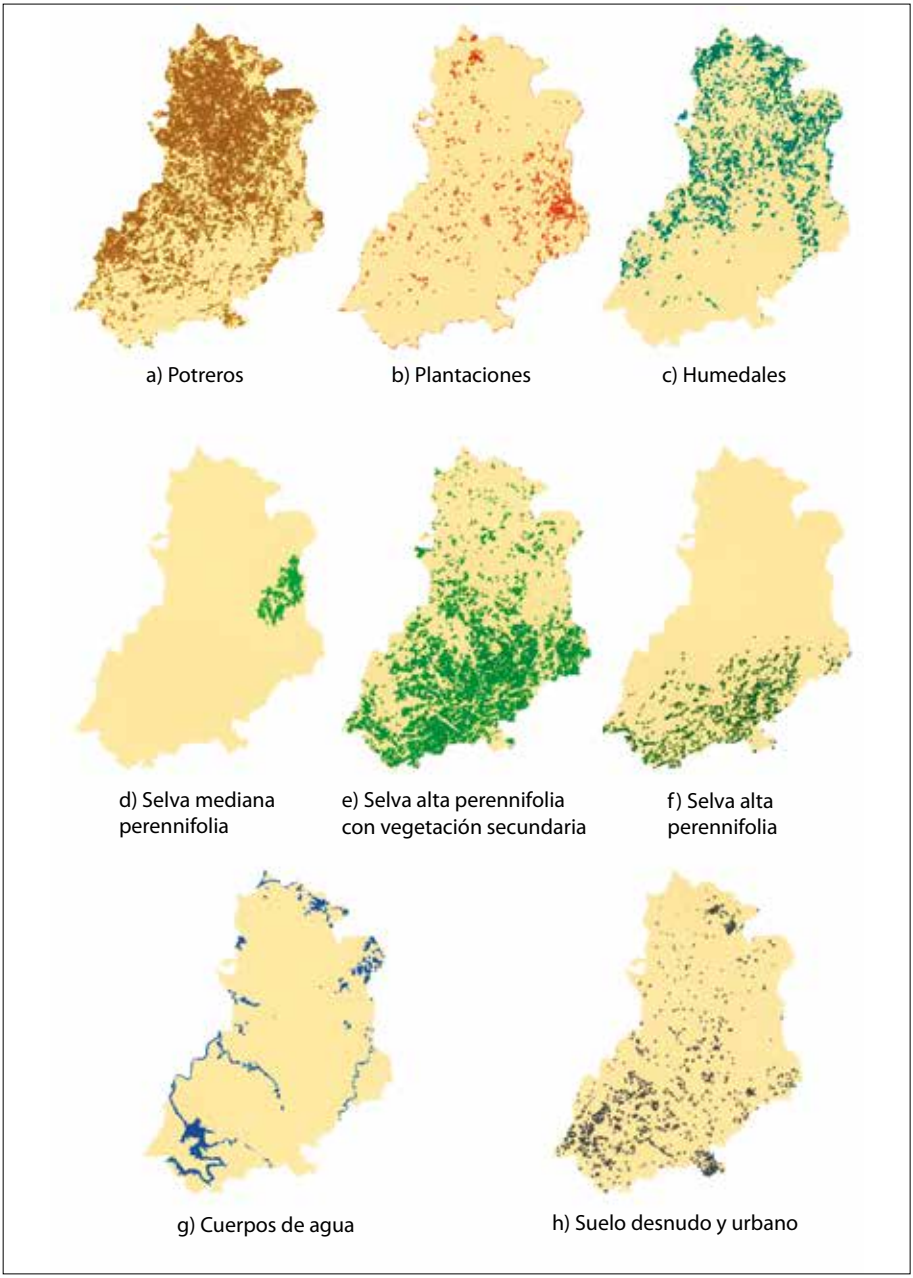


Figura 2. Distintos tipos de vegetación y uso del suelo en el territorio.

planicies del Norte, en terrenos llanos y cenagosos, son característicos los tintales, que son agrupaciones de palo de tinta o tinta (*Haematoxylon campechianum*), árbol espinoso, de tronco irregularmente acanalado y de escasa talla –menos de 15 m– bien conocido por el uso de su madera como colorante.

Existen diferentes condiciones de humedad dentro de los potreros, lo cual se observa con facilidad en los canales infrarrojos de la imagen. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que el mapa es el resultado de la interpretación de la misma, por lo cual refleja lo que el panorama de la cobertura terrestre en aquel momento. Aun así, se consideró importante el discriminar entre los grados de humedad de los potreros, ya que pueden estar relacionados con otras variables de tipo edafológico y geomorfológico.

Palmares. Este tipo de vegetación se halla constituido por las agrupaciones más bien densas de palmas altas, por lo común de una misma especie, con vegetación inferior o intermedia de pastizales o praderas. Está, por consiguiente, íntimamente relacionado con la sabana, con la cual puede en muchos casos mezclarse. Los palmares más típicos se desarrollan en suelos profundos que con frecuencia se anegan parcialmente en la temporada de lluvias, y, como en las sabanas, las plantas que los constituyen son resistentes a los fuegos que a menudo los arrasan en la época seca.

Los corozales, constituidos por corozo (*Scheelea Liebmannü*) y probablemente también *Scheelea Lundelli*, se encuentran en las planicies al norte de Pichucalco, cerca de Reforma, Las condiciones de suelo que favorecen el desarrollo de los corozales parecen ser semejantes a las que predominan en las sabanas, pero el grado de humedad durante las lluvias es mayor en el suelo de los palmares, los cuales se inundan frecuentemente. Pérez y Sarukhán (citados por Rzedowzki 1982) mencionan para la zona de Pichucalco la existencia de palmares de *Sabal yucatanica*.

2. Forestal. Existen puntos aislados de plantaciones de hule, en las cuales no existe evidencia de que en la actualidad exista alguna explotación. Se encontró un manchón de árboles que pueden ser plantaciones de Teca. Sin embargo, es prácticamente imposible diferenciar, con las fuentes de información disponible, las zonas exactas donde estas actividades se llevan a cabo, ya que en ambos casos el dosel de dichas plantaciones es muy semejante al de la selva alta perennifolia con vegetación secundaria y por tanto no hay diferencias significativas entre las firmas espectrales. Por lo

anterior, las plantaciones forestales se encuentran incluidas en el mapa dentro de la clase selva alta perennifolia con vegetación secundaria.

3. Agrícola. A lo largo de toda la zona en estudio se encontraron diversas plantaciones de cacao que son explotadas actualmente. Incluso existe un vivero para la reproducción del cacao, cuyas plántulas se reparten entre los productores de la zona. La forma en que el cacao es cultivado impide que se pueda identificar desde las imágenes u ortofotos, ya que los árboles de la selva permanecen en los cultivos para proporcionarles sombra. Los primeros pueden ser diversas especies de *Erythrina* (madre chontal, madre mansa, madre prieta) o bien plátanos. Las plantas de sombra provisional se cortan, cuando las definitivas han alcanzado el tamaño adecuado. La sombra definitiva es lograda por medio de leguminosas de crecimiento rápido, que tienen la ventaja de enriquecer el suelo en nitrógeno. La más usada en la zona de Pichucalco es el cocoíte (*Gliricidia sepium*), aunque en algunos casos se utiliza también el chipilcoíte (*Diphysa robinioides*); a veces se dejan como sombra árboles maderables de selva como la primavera (*Cybistax Donnell-Smithü*), roble o macuelís (*Tabebuia pentaphylla*), volador (*Terminalia amazonia*), Miranda (*op. cit.*) menciona, para 1952, el resurgimiento del cultivo del cacao en Chiapas. Las dos principales zonas productoras son la región de Pichucalco, Ostuacán y Juárez en el norte, y Soconusco, en el sur.

   Existe una plantación de naranjos, bien identificada, en el noreste de la zona en estudio. En otros puntos del área hay plantaciones que, de acuerdo con sus características espectrales, parecen ser de este mismo tipo de cultivos (Cuadro 1 y Figura 2b). Al este del territorio hay plantaciones de plátano principalmente en el municipio de Pichucalco. Aunque el plátano es frecuentemente encontrado como elemento aislado, las plantaciones mencionadas son las únicas comerciales, el resto parecen ser para autoconsumo. Sólo se encontró una plantación de mango al norte de la zona en estudio, por lo que no se considera un cultivo de importancia para la zona.

4. Humedales (Figura 2c). Existen en diferentes puntos del área en estudio zonas inundadas con popales y tulares. Éstos aparecen con frecuencia en el municipio de Reforma, adyacentes a cuerpos de agua, en terrenos planos permanentemente inundados.
5. Selva mediana perennifolia (Figura 2d). Al este de la zona en estudio existen dos manchones de selva inundable, con predominancia de canacoíte (*Bravaisia integérrima*). Los terrenos donde se encuentra esta clase

de selva son llanos y están permanentemente encharcados durante la temporada de lluvias, de junio o julio a marzo. Los charcos se forman debido al carácter muy poco permeable del suelo llano constituido por arcillas muy compactas; las partes de tierra emergentes las constituyen las amplias bases de los árboles.

La selva de canacoíte (*Bravaisia integerrima*), muy bien desarrollada en las planicies de la región de Pichucalco, tiene caracteres muy notables. Los charcos se forman debido al carácter muy poco permeable del suelo llano constituido por arcillas muy compactas; las partes de tierra emergentes las constituyen las amplias bases de los árboles. La selva es relativamente baja, de 20 a 30 m, con marcado predominio de canacoíte, que en los lugares más encharcados llega a ser árbol único. Este árbol tiene una forma característica, pues origina hacia la base de su tronco infinidad de raíces adventicias, de tal manera que en los lugares de charcos más profundos los troncos quedan en alto sostenidos por la masa de raíces entrelazadas, con lo que adquieren el típico aspecto de los mangles de la costa, aun sin pertenecer a la misma familia. Cabe destacar la importancia de la zona de "El Manzanillal", al este del Municipio de Juárez, Chiapas, que, según el Estudio Técnico Justificativo para Decretar como Zona de Protección de Flora y Fauna "El Manzanillal"(2000), es considerada como el último reducto con la mayor extensión de este tipo de vegetación, que anteriormente se encontraba también en Veracruz, Tabasco y Campeche, en la región del Golfo de México y en el lado del Pacífico, en la regiones costeras de Acapulco y Colima. Dicho informe menciona que es en la región del norte de Chiapas donde esta comunidad alcanza su máximo desarrollo y se entremezclan en ella elementos de selva alta como *Dyospiros digina*, *Ceiba pentandra* y *Vaiteria lundelli*; además de presentar un carácter más bien perennifolio por lo que ahora constituye una rareza única para México y el mundo.

Tanto López (1980) como Pérez y Sarukhán (citados por Rzedowzki 1982) refieren que la zona es un mosaico de diferentes tipos de selvas, de medianas subperenifolias a altas perennifolias en diferentes condiciones y sustratos.

6. Selva alta perennifolia con vegetación secundaria (Figura 2e). Un estimado de 27% del área está cubierto por remanentes de selva alta en algunas ocasiones como divisiones entre potreros y, en otras, como elemento de sombra para el cultivo del cacao. Sin embargo, esta alteración no es una condición reciente, ya que Miranda menciona, en 1952, que en el

cuadrilátero definido por los pueblos de Ostuacán, Quechula, Ocosingo y Salto de Agua existe una densa población indígena, establecida de antiguo allí, donde las selvas han sido taladas en grandes extensiones y substituidas por vegetación secundaria. Por lo general, en esta zona las selvas sólo se han conservado en los lugares escarpados donde han sido imposibles las actividades agrícolas.

7. Selva alta perennifolia (Figura 2f). Los únicos manchones de selva alta perennifolia en condiciones más o menos conservadas, son las de la zona núcleo de la Reserva de Santa Ana, ubicada en el este de la zona en estudio o de áreas aisladas en condiciones de alta pendiente al sur.

   Miranda (*op. cit.*) menciona las selvas con predominio de guapaque (*Dialium guianense*) en las zonas bajas y muy húmedas del pie de las serranías del norte del macizo central. Para la región de Pichucalco se encuentra asociado con castaño (*Sterculia mexicana*).
8. Suelo desnudo, depósitos aluviales y zonas urbanas (Figura 2h). En la imagen de satélite se discriminaron las zonas con "suelo desnudo" que agrupaban tanto los depósitos aluviales de los cauces de los ríos, como los derrames de lava que rodean el cráter del Volcán Chichonal y que cubren un aproximado del 5% del área (Cuadro 1). Como un proceso posterior y con las ortofotos como referencia, se diferenciaron estas dos categorías

Niveles de fragmentación del uso del suelo

Desde el punto de vista de conservación, es muy importante analizar el tamaño y la distribución de cada tipo de vegetación presente en el área en estudio. Los resultados arrojan datos muy significativos. Por una parte, se tiene a la selva mediana perennifolia, que abarca un 2% del área y que tiene únicamente 12 polígonos (Figura 2), sin embargo, la relación entre el área y el perímetro (A/P) es la más grande (Figura 3), lo que significa áreas grandes con pocos "bordes" que, desde el punto de vista de protección, presentan mejores posibilidades. Por otra parte, la selva alta perennifolia representa el 5% de la superficie total y está representada por 315 polígonos y posee una mucho menor relación A/P, lo cual nos indica polígonos pequeños con perímetros grandes (Figura 4).

Estado actual de la cobertura terrestre

Es claro que la zona ha sufrido profundas transformaciones a partir de la vegetación original, compuesta en su mayoría de diferentes tipos de selva alta a mediana perennifolia. El uso extensivo del suelo con fines ganaderos ha provocado

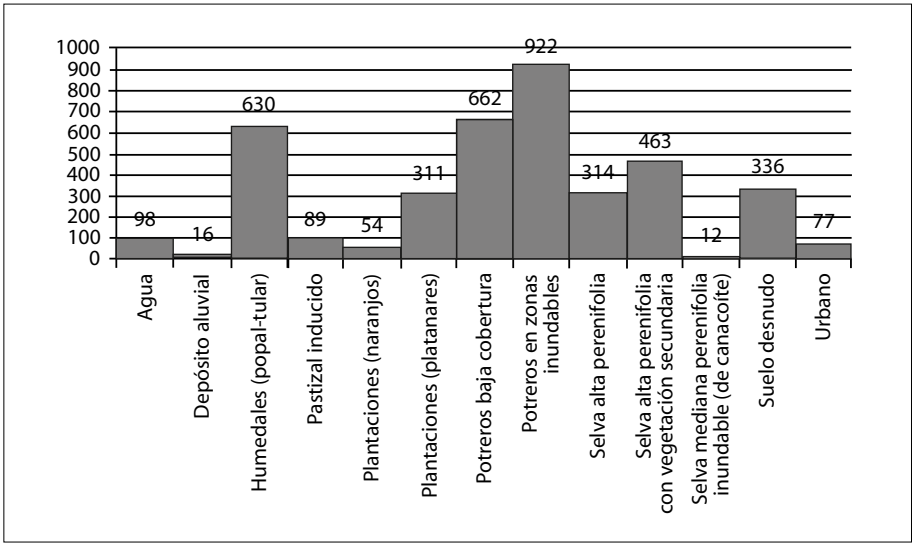


Figura 3. Número de polígonos por clase.

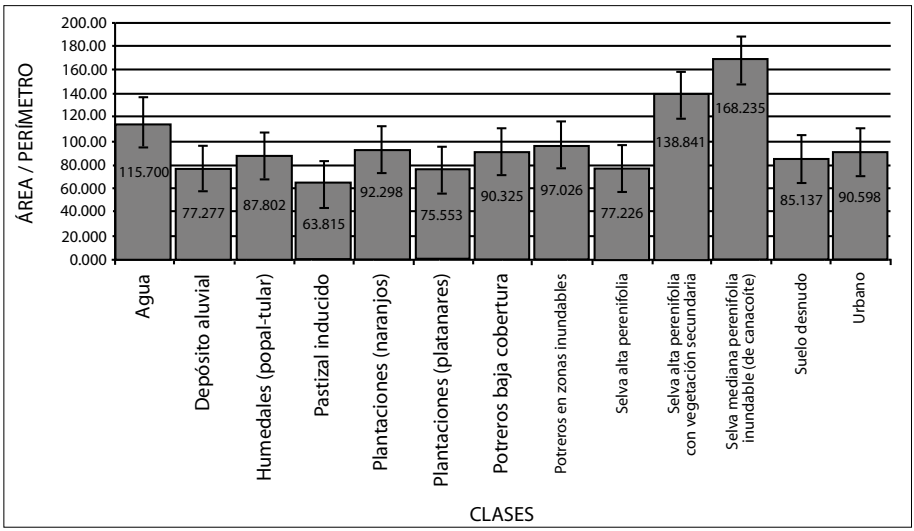


Figura 4. Relación área perímetro por tipo de cobertura vegetal.

la deforestación de grandes extensiones de selvas y ha dejado pequeños acahuales aislados. Este fenómeno se ha visto favorecido por la topografía, menos accidentada de la parte norte, principalmente en el municipio de Reforma. Al sur, en las inmediaciones del volcán Chichonal, las pendientes más pronunciadas han impedido la deforestación en alguna medida, por lo que aún existen algunos manchones bien conservados.

Grandes porciones de la selva son utilizadas para el cultivo de cacao con la consecuente eliminación de las especies de los niveles medio y bajo, para hacer espacio para los árboles de cacao, dejando únicamente algunos elementos del dosel para proporcionar sombra a la plantación.

Mención aparte merece la selva mediana perennifolia de canacoíte, que por encontrarse en terrenos inundados permanentemente, no ha sido alterada, constituyendo un manchón de gran tamaño en la zona conocida como "El Manzanillar" al este de la zona en estudio.

Durante el trabajo de campo se pudo apreciar la existencia de algunas especies de mamíferos como el mono araña (*Ateles geoffroyi*) –especie que requiere de grandes extensiones de bosque no perturbado y especializado en frutos maduros, por lo que puede considerarse como una especie indicadora–, lo que es señal de buenas condiciones al interior de dicha zona.

Cambio en la cobertura por clase

En primera instancia se hará una descripción de los principales cambios por tipo de vegetación, producto de la clasificación e interpretación de las imágenes Landsat TM y ETM de 1986 y 2002, respectivamente, para luego analizar estadísticamente los cambios de acuerdo con su severidad y finalizar con un resumen respecto a las principales problemáticas observadas.

Agua. Las zonas cubiertas por cuerpos de agua se encuentran entre las zonas con mayor cambio. La primera razón es la construcción de la presa Peñitas en el suroeste de la zona en estudio (Figuras 5a y b). Esto marca diferencias no sólo puntuales, es decir, en el embalse del río, sino a lo largo de los ríos que confluyen en la zona. Sin embargo, a diferencia de otras zonas, tal vez más áridas, no se aprecia un cambio marcado en el uso del suelo de la zona, debido a que el agua no es, para la zona, un factor que limite las actividades productivas.

Existen también cambios importantes en el norte de la zona en estudio, que incluye al sistema Lagunar de San Miguel, en el municipio de Reforma (Figuras 5c y d). Espectralmente se nota un incremento en la cantidad de pigmentos fotosintéticos, lo cual se puede interpretar como un proceso de eutrofización del sistema lagunar. En 2001 Vázquez-Botello reporta, adicionalmente a problemas

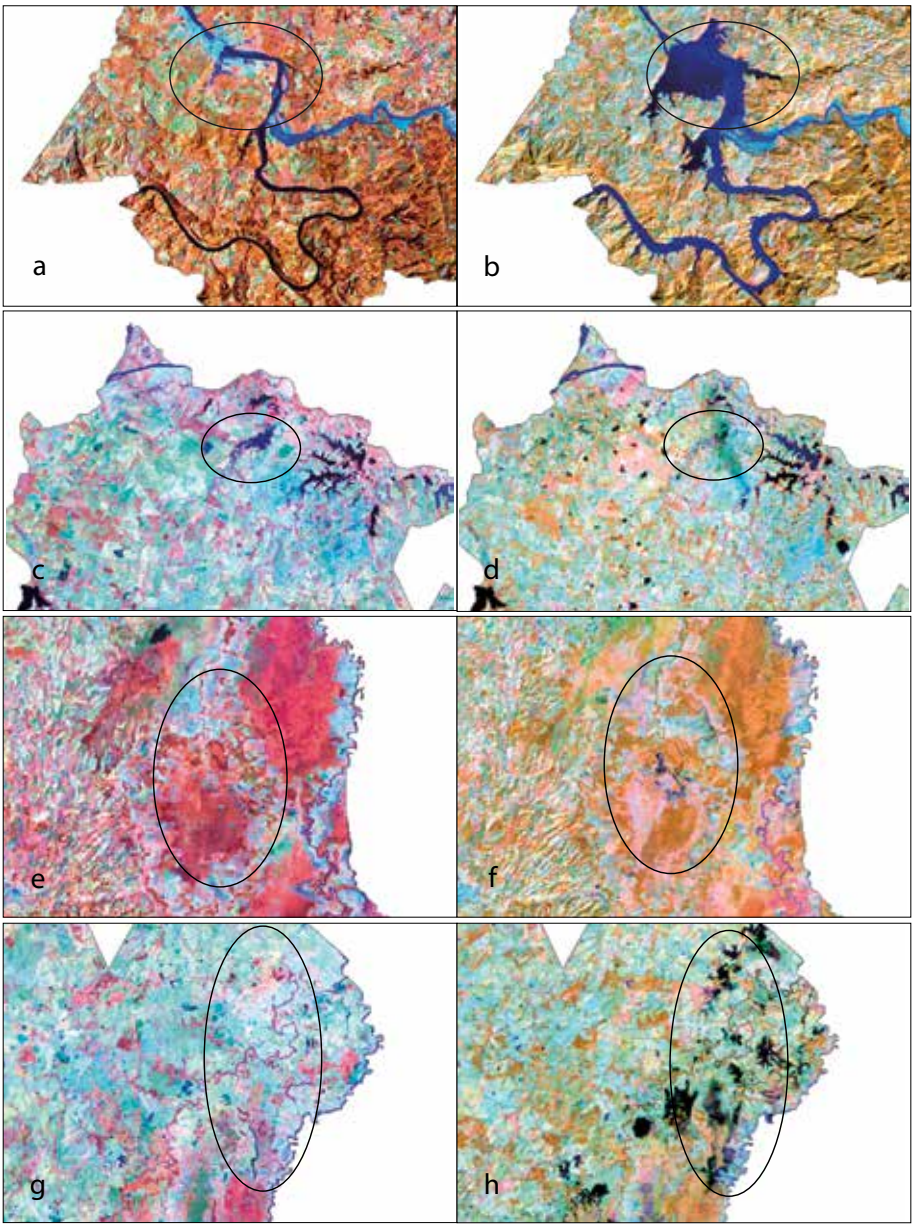


Figura 5. Fragmentos de las imágenes Landsat TM de 1986 (izquierda) y Landsat ETM+ de 2002 (derecha).

de contaminación química, la presencia de abundante lirio acuático y materia orgánica para la Laguna el Limón, Chiapas, perteneciente a este sistema Lagunar. Existen, además, varios cuerpos de agua que desaparecen hacia 2002 y que podrían haber sido desecados artificialmente. Dado que ambas imágenes pertenecen al final de la temporada lluviosa, noviembre y octubre, respectivamente, no cabría esperar un decremento tan importante en la extensión de los cuerpos de agua.

Suelo desnudo y depósitos aluviales. El cambio más importante de la zona en este tipo de coberturas, es debido a un fenómeno natural, la erupción del Volcán Chichonal el 21 de marzo 1982. Hacia 1986, el flujo de material del cono es muy marcado y la zona aledaña se encuentra completamente desprovista de vegetación. Los depósitos aluviales y de material volcánico son evidentes en los cauces de los ríos cercanos al Volcán. En 2002 la recuperación de la vegetación en las zonas próximas al cono es importante y las zonas de depósitos aluviales se han reducido un poco.

Urbano. A excepción del poblado de Reforma y sus zonas de instalaciones petroleras cercanas, la presión por aumento de mancha urbana es pequeña.

Agrícola. Existe un incremento notorio en la superficie cultivada, especialmente en lo que se refiere al plátano y a la naranja. El plátano se concentra en el municipio de Pichucalco. En 1986 la actividad estaba mucho más restringida a algunas hectáreas a lo largo del cauce del río Pichucalco. Para 2002 comienza a extenderse al norte, cercano a la zona conocida como El Manzanillar (Figuras 5e y f).

En el norte, dentro del municipio de Reforma, existe un solo campo de cultivo de naranja, pero de gran extensión, cuyo establecimiento es posterior a 1986. En cuanto al comportamiento de otro tipo de cultivos, como el cacao, es difícil de evaluar a la escala y con las metodologías de este estudio, ya que se desarrollan bajo la sombra de la selva mediana perennifolia alterada.

Potreros. Toledo (1998) menciona que la ganadería existe en las llanuras costeras de Chiapas desde la época de la colonia. Sin embargo, no es sino hasta mediados del siglo XX cuando la ganadería se "adueñó de prácticamente todos los espacios del trópico" y devastó tanto las selvas bajas caducifolias como las selvas altas. Según este autor, la frontera ganadera no tuvo límites en el sureste. Lo mismo invadió humedales y llanuras costeras, márgenes de ríos, que zonas montañosas. Para 1998, el 63% de la superficie de Chiapas es ocupada por una ganadería extensiva, con un rendimiento de apenas 1.5 ha/cabeza de ganado. Chiapas pasó de una superficie ganadera estimada en 16% de su territorio, en 1940, a 63% en sólo cuatro décadas.

Este análisis parece confirmar esta apreciación, la frontera entre las zonas de sistemas artificiales (agrícola y ganadero) y los ambientes naturales, parecen

haber tenido poca modificación desde 1986. La mayor extensión de la zona estudiada está dedicada a la ganadería, sin embargo, los cambios al interior de la zona ganadera son difíciles de cuantificar ya que dependen del manejo que se les esté dando por parte de los ganaderos de la zona.

Humedales. Estos sistemas son naturalmente muy dinámicos y obviamente su distribución dependerá de la disponibilidad de humedad. Como ya se mencionó, la zona norte, donde se encuentran los sistemas lagunares más importantes, ha sufrido cambios en la conformación de los cuerpos de agua, lo que por consecuencia provoca variaciones en la ubicación y extensión de los humedales (Figuras 5e, f, g y h). Se deberá tomar en cuenta la presencia de contaminantes antes mencionada como una de las posibles causas.

Selva mediana perennifolia de canacoíte. Este tipo de vegetación se encuentra bien representado en la zona conocida como el Manzanillal (Figuras 5c y d). Este sistema representa un manchón de considerable extensión con casi nula fragmentación. Al interior de la zona es de destacarse la ausencia de cambios en 18 años, sin embargo, las zonas que la bordean presentan cambios importantes que hacen que la selva se vaya perdiendo en un patrón anular. Hacia el oeste predominan los potreros, mientras que al este el cultivo de plátano se ha incrementado notablemente.

Selva alta perennifolia. El cambio en la extensión de este tipo de vegetación es poco, a excepción de las zonas que bordean al Manzanillal y la Finca Santa Ana, Municipio de Pichucalco (zona de protección), produciendo manchones aislados de cada vez menos tamaño.

En cuanto al grado de conservación, es difícil estimar a partir de las imágenes, sin embargo, como ya se mencionó, desde 1952 Miranda reporta importantes alteraciones. Por lo general, en esta zona las selvas sólo se han conservado en los lugares escarpados donde han sido imposibles las actividades agrícolas.

Análisis estadístico del cambio

A partir de la diferencia de los NDVI, para 1986 y 2002 se obtuvieron las zonas donde la cobertura ha sido modificada. En algunos casos existen procesos donde la cubierta vegetal parece estar incrementándose, por reforestación, eutroficación en algún grado o incremento en superficie agrícola. A este primer fenómeno nos referiremos como incremento. Por otra parte, la pérdida de la cubierta vegetal, por procesos como deforestación, incremento de cuerpos de agua o extensión de manchas urbanas será denominada decremento. De acuerdo con la severidad del cambio se han dividido los cambios en tres más las zonas donde no se reportan cambios.

En el Cuadro 3 se cuantifican por superficie y porcentaje cada uno de estos cambios. Es importante notar que prácticamente el 80% de la zona no ha tenido cambios en los últimos 18 años y que el cambio está uniformemente distribuido entre las zonas con incrementos o decrementos.

Gran incremento. Las zonas con mayor incremento se encuentran en las inmediaciones del volcán Chichonal y las zonas del complejo lagunar de San Miguel como se muestra en la Figura 6. En el primer caso, como ya se mencionó, se debe a la recuperación de la vegetación posterior a la erupción del volcán. En el segundo, pérdida de cuerpos de agua que dan paso a zonas inundables, o eutrificación de otros cuerpos de agua (Figuras 5c y d). Es evidente que hay otras zonas donde el cambio también es importante, pero constituyen manchones aislados que, en su mayoría, se ubican dentro de los potreros. Cabe destacar como el cambio no siempre implica la modificación en el de tipo de cobertura; por ejemplo, las zonas de cambio dentro de los cuerpos de agua permanecen en un 40% aproximadamente, sin embargo, sus características espectrales son diferentes, lo que habla de un cambio en su composición química.

Incremento moderado. Este tipo de cambio se encuentra en manchones de pequeño tamaño a lo largo de toda la zona en estudio, como lo muestra la Figura 6. Dichos manchones son más abundantes en la zona norte, municipio de Reforma, donde hay concentración de zonas pecuarias, así como en el municipio de Pichucalco donde se han incrementado los cultivos de plátano. En las Figuras 5g y h se puede apreciar cómo algunas zonas de humedales se han incorporado a los potreros y algunas zonas con suelo desnudo han pasado a ser potreros.

Incremento. Como en el caso anterior, el incremento se encuentra muy disperso a lo largo de la zona (Figura 6), con ligeras concentraciones a lo largo del río Pichucalco, correspondiendo con cultivos de plátano y en las zonas de hu-

Cuadro 3. Grado de cambio entre 1986 y 2002 para la zona en estudio

Tipo de cambio	Porcentaje de la superficie total	Superficie en km^2
Gran incremento	2.46	110
Incremento moderado	4.45	199
Incremento	3.51	157
No cambio	79.29	3 548
Decremento	4.34	194
Decremento moderado	2.56	114
Gran decremento	3.39	151

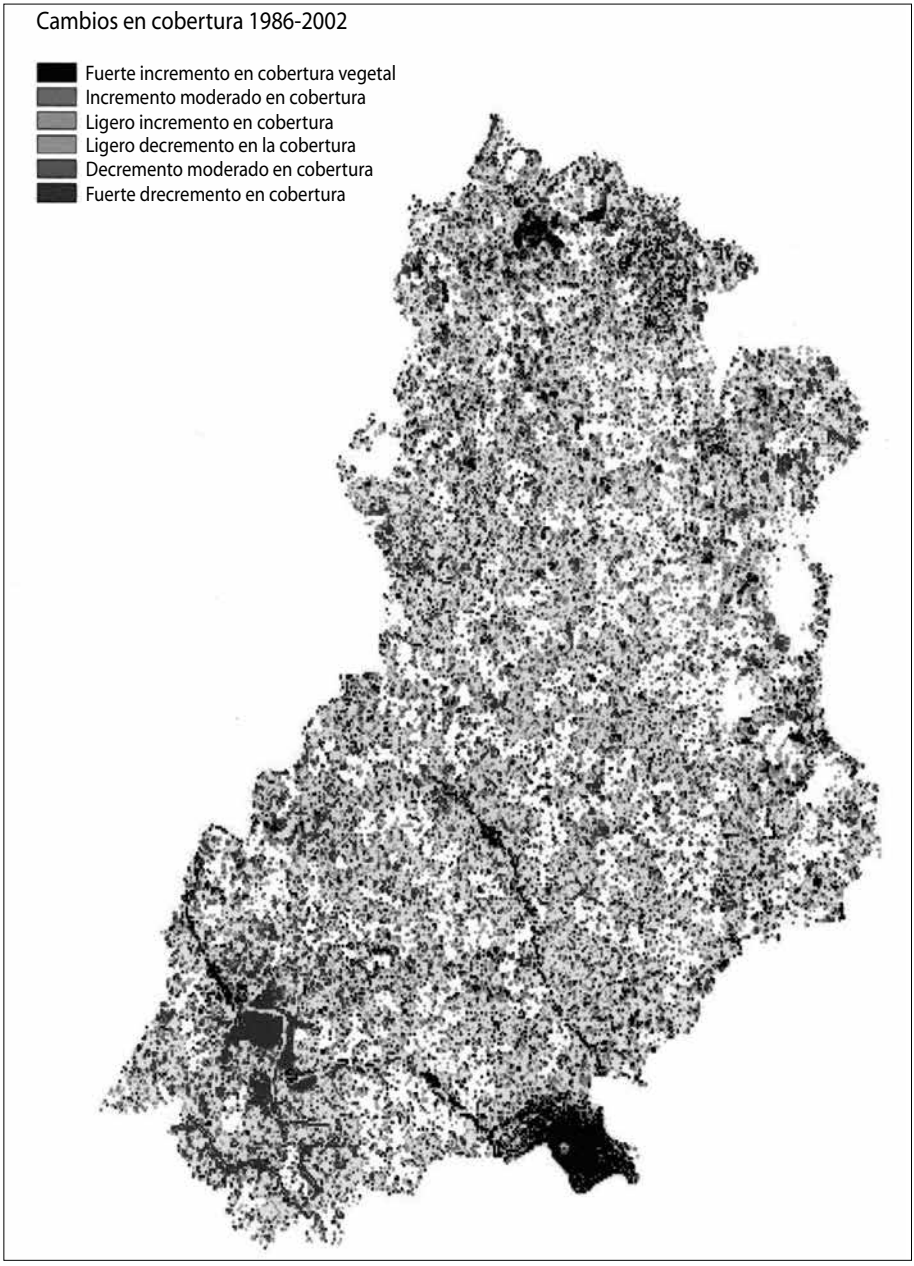


Figura 6. Cambio en cobertura entre 1986 y 2002.

medales del municipio de Reforma, un porcentaje importante del cambio de los humedales es hacia potreros.

Decremento. Cambios dispersos, especialmente en el sur, suroeste de la zona (Figura 6). Hay sustitución de selvas altas por potreros y de selvas inundables por humedales.

Decremento moderado. Aun más disperso que los anteriores (Figura 6). Cabe destacar el cambio hacia zonas inundables por parte de las selvas altas y medianas.

Gran decremento. El primer gran cambio detectado es la aparición de la presa Peñitas y el incremento en la superficie del cauce del río Grijalva, que por supuesto marca una baja drástica en la cubierta vegetal (Figuras 5a y b). Adicionalmente, nótense los cambios que se concentran al este de la zona en estudio, bordeando la zona conocida como el Manzanillal (Figuras 5e y f).

Indicadores para evaluación de cambio de uso del suelo y vegetación

De acuerdo con Palacio *et al*. (2004), la identificación espacial y la cuantificación de los cambios contribuyen a la caracterización del territorio y a la ubicación de áreas de atención prioritarias, así como al establecimiento de políticas correctivas y a la formulación de planes de acción respectivos para el mejor manejo de los recursos.

La tasa de deforestación es un indicador de presión sobre los recursos forestales y resulta un elemento esencial en la evaluación y diagnóstico del comportamiento de otras variables ambientales (clima, suelos, hidrología, entre otras) y socioeconómicas (crecimiento demográfico, densidad de población, actividades económicas, entre otras) asociadas. Las coberturas leñosas (bosques, selvas y matorrales en sus condiciones primarias y secundarias) se agregan, y su dinámica de cambio se describe en un modelo. En éste se enfatiza la probabilidad de cambio de cualquiera de estas categorías hacia las cubiertas antropogénicas. A este cambio se le denomina *proceso de deforestación* y a partir del mismo se calculan las tasas de cambio de acuerdo con la ecuación utilizada por la FAO (1996). Esta tasa expresa el cambio en porcentaje de la superficie al inicio de cada año.

$$\partial n = \left[\frac{S_2}{S_1} \right]^{1/n} - 1 ,$$

en donde: ∂n = tasa de cambio (para expresar en %, hay que multiplicar por 100),

S_1 = superficie en la fecha 1,

S_2 = superficie en la fecha 2,
n = número de años entre las dos fechas.

De la comparación de ambas fechas se hacen evidentes varios cambios –que se resumen en los Cuadros 4 y 5 y la Figura 7– tales como el incremento en la superficie cubierta de agua, producto de la construcción de la presa Peñitas en el municipio de Sunuapa, aumento en la cobertura urbana y de suelo desnudo. Por el contrario, la superficie con depósitos aluviales disminuye, por una recuperación de la vegetación en la zona de la erupción del volcán, así como una pérdida de cobertura de selvas y humedales.

Índice de antropización

Este índice agrega todas las coberturas a nivel de formación en dos categorías: "Natural" y "Antrópica". En la categoría "Natural" se incluyen la formación "Bosques", "Selvas", "Matorral", "Vegetación hidrófila", "Otros tipos de vegetación" y de la formación "Pastizal" las comunidades "Pradera de alta montaña", "Pastizal natural" y "Sabana". La categoría antrópica agrupa la formación "Cultivos", la comunidad "Pastizal cultivado", la comunidad "Pastizal inducido" y el uso de suelo "Asentamiento humano". La relación en superficie entre estas dos categorías representa el grado de antropización del territorio.

A pesar de los cambios existentes entre las diferentes coberturas, al agruparlas, no encontramos una tendencia hacia la antropización, como puede observarse en el Cuadro 6.

Cuadro 4. Superficies de cada cobertura y porcentajes de cambio $(t_1 - t_2)/t_1$

Clase	Superficie 1986 (km^2)	Superficie 2020 (km^2)	Diferencia en km^2	Diferencia %
Agua	49 934	136 292	86 358	172.94
Urbano	19 273	27 385	8 112	42.09
Humedales	535 130	377 934	-157 196	-29.38
Potreros	1 072 919	1 123 504	50 585	4.71
Selva alta	1 149 899	973 127	-176 772	-15.37
Suelo desnudo	77 114	169 219	92 105	119.44
Selva mediana	92 819	63 357	-29 462	-31.74
Depósitos aluviales	28 381	7 623	-29 758	-73.14

Cuadro 5. Tasas de cambio anualizadas por tipo de cobertura, por municipio

Clase	Juárez (%)	Ostuacán (%)	Pichucalco (%)	Reforma (%)	Sunuapa (%)	Total general (%)
Agua	18.75	6.65	7.78	2.03	24.29	6.88
Depósitos aluviales		-7.61	-8.16		-9.17	-7.90
Humedales (popal-tular)	-2.35	2.09	-1.51	-1.92	-10.28	-1.84
Potreros baja cobertura	-1.92	-2.72	-0.07	-2.42	0.20	-2.05
Poteros en zonas inundables	6.86	-1.98	-0.35	10.53	-4.87	2.77
Selva alta perennifolia	-17.71	-7.46	-6.18		-5.98	-6.90
Selva alta perennifolia con vegetación secundaria	-3.41	3.86	0.83	-4.46	4.96	0.58
Selva mediana perennifolia inundable (de canacoíte)	-2.74		-2.27			-2.69
Suelo desnudo	15.84	16.10	2.11	-2.3	11.31	7.73
Urbano	10.04	187.49	2.66	1.73		3.64

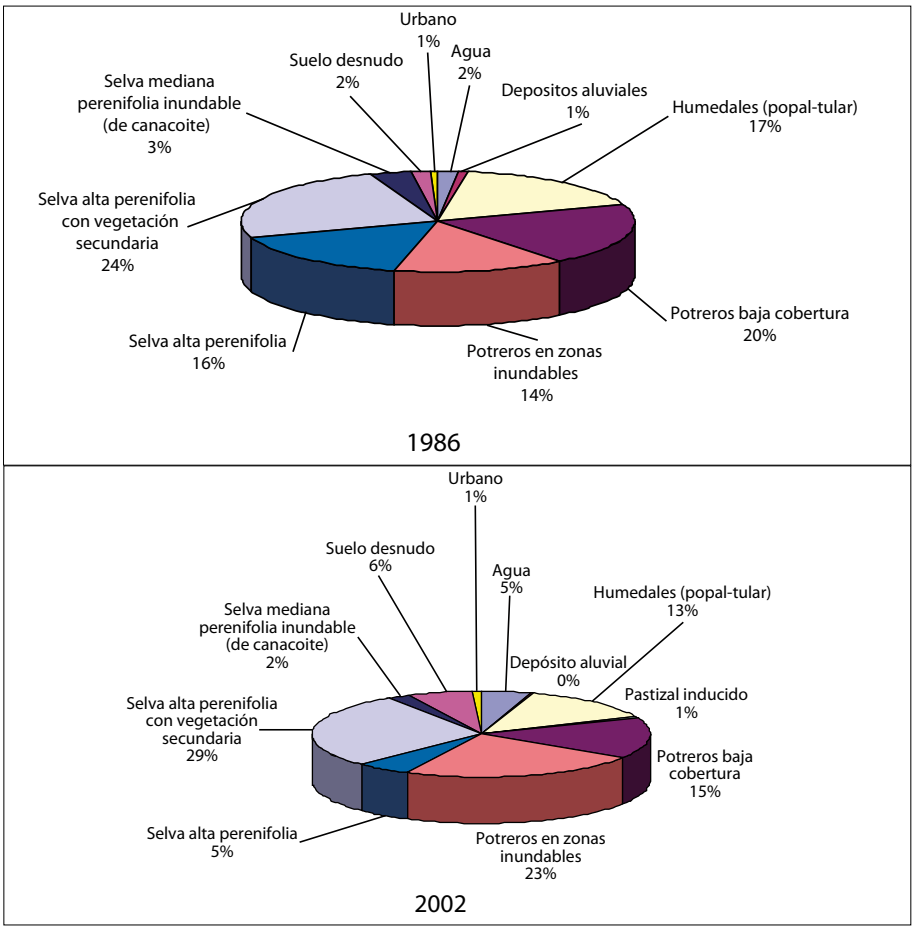


Figura 7. Distribución en porcentaje de los diferentes usos del suelo.

Cuadro 6. Tasas de cambio para superficies antrópicas

Tipo de cobertura	Superficie 1996	Superficie 2002	Superficie de cambio	Porcentaje de cambio	Tasa de cambio (%)
Cubierta antrópica	1 092 192	1 150 889	58 697	5.37	0.33
Cubierta natural	1 933 277	1 727 552	-205 725	-10.64	-0.70

Discusión

A lo largo de este trabajo se ha hablado de las zonas que han cambiado, sin embargo, es necesario destacar las que no han cambiado. En este caso las zonas de selva mediana perennifolia de canacoíte, en la zona del Manzanillal, representan manchones de extensiones considerables que no han sufrido alteración a su interior.

Por el contrario, las zonas circundantes al Manzanillal presentan extensos cambios que son una presión sobre el perímetro de esta importante zona de vegetación natural. De especial preocupación es el hecho del incremento de los cultivos de plátano, dado que utilizan gran cantidad de fertilizantes e insecticidas, que en condiciones de inundación, muy frecuentes en la zona, serán transportados fácilmente a las zonas de selva primaria, con sus consecuentes efectos sobre la fauna y flora.

Por otra parte, la zona circundante al volcán Chichonal presenta un muy interesante fenómeno de sucesión, donde a partir de la erupción de 1982 se ha dado un repoblamiento paulatino. De nuevo la presión de las actividades productivas en la periferia de la zona, deberá ser monitoreada. En este caso es la ganadería, en pequeña escala y por tanto difícil de cuantificar, que puede provocar importantes cambios en el proceso de sucesión.

Las zonas inundables y de complejos lagunares del municipio de Reforma presentan cambios preocupantes. Por una parte hay cuerpos de agua con fuertes incrementos en el contenido de clorofila, que en este caso representan procesos de eutrofización, lo cual constituye un decremento en la calidad del agua. Asimismo, algunos cuerpos de agua han desaparecido y al parecer han sido sustituidos por humedales o potreros. Informes puntuales hablan de una fuerte contaminación de los cuerpos de agua, situación que deberá seguir siendo monitoreada y controlada.

La selva alta perennifolia ha sufrido una fuerte fragmentación a lo largo de muchos años, en un proceso que comenzó mucho antes del periodo de este estudio, sin embargo, en las zonas menos accesibles hay algunos manchones en buen estado de conservación.

En algunas zonas existen cambios entre la zona ganadera, que ha sido sustituida por superficie agrícola; sin embargo, el cambio en la frontera agrícola es poco, sólo detectable, como ya se mencionó, en la zona del Manzanillal.

Toda esta información detallada acerca del estado de la vegetación y los cambios sufridos en 16 años permite ver las tendencias de diferentes coberturas y regiones a lo largo de la zona en estudio con bastante detalle. Así se ponen de relieve cambios importantes, como el estado de conservación dentro del mismo tipo de vegetación, que con métodos más simples de evaluación de cambio, tales

como la comparación de mapas vectoriales de uso del suelo y vegetación, no se podrían identificar. De esta forma la información para el ordenamiento territorial se enriquece y resalta las zonas para recuperación, conservación y manejo que, junto con muchos otros insumos de tipo natural y social, darán por resultado un uso racional de los recursos.

Referencias

Anderson, G. L., J. D. Hanson and R. H. Hass (1993), "Evaluating Landsat thematic mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands", *Remote Sensing of the Environment*, no. 35, pp. 11-27.

Bocco, G., M. Mendoza y O. Masera (2001), "La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán", *Investigaciones Geográficas*, *Boletín*, núm. 44, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 18-38.

Botkin, D. B., M. F. Caswell, J. E. Estes and A. A. Orio (eds.; 1989), *Changing the global environment: perspectives of human involvement*, Academic Press, USA.

Daily, G. C. (ed.; 1997), *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Islan Press, USA.

Estudio Técnico Justificativo para Decretar como Zona de Protección de Flora y Fauna "El Manzanillal" (2000), Instituto de Historia Natural de Chiapas y Secretaría de Ecología, Recursos Naturales y Pesca del Gobierno del Estado de Chiapas.

Fung, T. and E. LeDrew (1988), "The determination of the optimal threshold levels for change detection using various accuracy indices", *Photogrametric. Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, no. 10, pp. 1449-1454.

Gobierno del Estado de Chiapas, Programa Especial de Desarrollo Sustentable de la Región Petrolera del Estado de Chiapas, PEMEX y el Gobierno del Estado de Chiapas, Diciembre 2005.

Gómez, G. (1997), "Patrones de cambio en la zona de la presa Marte R. Gómez, Tamaulipas, México", *Investigaciones Geográficas*, *Boletín*, núm. 35, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 121-135.

Gómez Mendoza, L., l. Galicia, M. L. Cuevas-Fernández, V. Magaña, G. Gómez Rodríguez and J. L. Palacio-Prieto (2008), "Assessing onset and length of greening period in six vegetation types in Oaxaca, Mexico, using NDVI-precipitation relationship", *International Journal of Biometeorology*, no. 52, pp. 511-520.

Lambin, E. (1997), "Modeling and monitoring land-cover change processes in tropical regions", *Progress in Physical Geography*, no. 21, 3, pp. 375-393.

López Mendoza, R. (1980), *Tipos de vegetación y su distribución en el estado de Tabasco y norte de Chiapas*, Colección Cuadernos Universitarios, Serie Agronomía, no 1, Universidad Autónoma Chapingo.

Massiris, Á. (2001), "Cualidades y desafíos de las políticas latinoamericanas de OT", en UAEM, *Coloquio Geográfico sobre América Latina*, 27 y el 29 de junio de 2001, Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México (México).

Miranda, F. (1952), *La vegetación de Chiapas*, 2ª. ed., (1975), Ediciones del Gobierno del Estado.

Ochoa-Gaona, S. and M. González-Espinoza (2000), "Land use and deforestation in the highlands of Chiapas, Mexico", *Applied Geography*, no. 20, pp. 17-42.

Palacio-Prieto, J. L., M. T. Sánchez-Salazar, J. M. Casado Izquierdo, E. Propín Frejomil, J. Delgado Campos, A. Velázquez Montes, L. Chías Becerril, M. I. Ortiz Álvarez, J. González Sánchez, G. Negrete Fernández, J. Gabriel Morales, R. Márquez Huitzil, T. Nieda Manzano, R. Jiménez Rosenberg, E. Muñoz López, D. Ocaña Nava, E. Juárez Aguirre, C. Anzaldo Gómez, J. C. Hernández Esquivel, K. Valderrama Campos, J. Rodríguez Carranza, J. M. Campos Campuzano, H. Vera Llamas Cruz y C. G. Camacho Ramírez (2004), *Indicadores para la caracterización y el Ordenamiento Territorial*, SEDESOL, SEMARNAT, INE, UNAM.

Palacio-Prieto J. L., G. Bocco, A. Velázquez, J. F. Mas, F. Takakai Takaki, A. Victoria, L. Luna González, G. Gómez Rodríguez, J. López García, M. Palma Muñoz, Irma Trejo Vázquez, A. Peralta Higuera, J. Prado-Molina, A. Rodríguez Aguilar, R. Mayorga Saucedo y F. González Medrano (2000), "La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000", *Investigaciones Geográficas*, *Boletín*, núm. 43, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 183-203 (nota técnica). Disponible en http://indy2.igeograf.unam.mx/ua_morelia/_private/condicion_actual.pdf.

Rzedowski, J. (1978), *Vegetación de México*, Limusa, México.

Sánchez-Salazar, M. T. y J. L. Palacio-Prieto (2004), "La experiencia mexicana en la elaboración de los programas estatales de ordenamiento territorial. Diagnóstico, problemática y perspectivas desde el punto de vista de la participación del Instituto de Geografía de la UNAM", *Investigaciones Geográficas*, *Boletín*, núm. 53, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 75-97.

Saunders, D. A., R. J. Hobbs and C. R. Margules (1991), "Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review", *Conservation Biology*, no. 5, pp. 118-32.

SEMARNAT (2005), *Informe de la situación del medio ambiente. Compendio de estadísticas ambientales* (http://www.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04).

Singh, A. (1989), "Digital change detection techniques using remotely-sensed data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, no. 6, pp. 989-1003.

Toledo, A. (1998), "A hacia una economía política de la biodiversidad y de los movimientos ecológicos comunitarios", *Revista Chiapas*, núm. 6, Era-Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM, México.

Toledo, V. M, P. Alarcón y L. Barón (2002), "Revisar lo rural: un enfoque socioecológico", *Gaceta Ecológica*, núm 62, Instituto Nacional de Ecología, México, pp. 7-20.

Tricart, J. y J Kilian (1982), *La ecogeografia y la ordenación de/ medio natural*, Anagrama, Barcelona, España.

Velázquez, A., J.-F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio (2002), "Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México", *Gaceta Ecológica*, núm. 62, INE-SEMARNAT, pp. 21-38.

Capítulo 9. Análisis satelital multitemporal de la vegetación

Lilia Manzo Delgado
Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE)
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

El índice de vegetación NDVI (Normal Difference Vegetation Index) derivado del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) de los satélites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) es un parámetro que permite conocer las características de la vegetación relacionadas con la biomasa foliar, la actividad fotosintética y el contenido de agua del dosel forestal (Reed *et al*., 1994). Por más de tres décadas las imágenes AVHRR-NOAA se han considerado las más adecuadas para analizar la variabilidad estacional de la vegetación, debido a su frecuencia de captación diaria con dos satélites (cada seis horas), a su resolución espacial (1.1 km) y cinco canales espectrales, uno en el visible y cuatro en diferentes regiones del infrarrojo, logrando con ello un monitoreo a escala regional y global (Justice *et al*., 1985; Lee *et al*., 2002).

La construcción de las series de tiempo del NDVI generadas a partir de las imágenes AVHRR-NOAA (en adelante llamado NDVI-AVHRR), han permitido evaluar la dinámica estacional de la vegetación, logrando revelar los patrones fenológicos de varias comunidades vegetales, entre los que destacan los pastizales, los matorrales y los bosques estacionales templados y tropicales (Batista *et al*., 1997). A escala global, las series de tiempo NDVI-AVHRR muestran que el comportamiento fenológico guarda una estrecha relación con las variaciones estacionales de temperatura y precipitación, además de la ubicación geográfica (Lee *et al*., 2002). Asimismo, ha sido posible relacionar la variabilidad del NDVI con las distintas fases fenológicas. El intervalo de variación del NDVI queda comprendido entre –1 y 1; donde la vegetación siempre registra valores positivos según la estructura, fisonomía y densidad del tipo de vegetación (Reed *et al*., 1994). En la época lluviosa el NDVI registra los valores más altos, entre 0.5 y 0.8, debido al

desarrollo y la producción de la biomasa foliar de cada tipo de vegetación; mientras que en el periodo de sequía el NDVI presenta valores bajos, alrededor de 0.2 y 0.3, que representan la senescencia y caída del follaje (Birky, 2001). La fenología de la vegetación también responde a eventos climáticos de gran magnitud y que son menos frecuentes, como las sequías ocasionadas en algunas regiones por el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Estas intensas sequías ocasionan varios problemas de estrés hídrico que repercuten en una disminución aún mayor de los umbrales mínimos del NDVI (Li y Kafatos, 2000).

En México existen muy pocos estudios sobre la variabilidad estacional del NDVI en la cobertura forestal y los reportados en la literatura se enfocan particularmente a las áreas agrícolas (Granados, 1998). Por consiguiente, el objetivo de este capítulo fue analizar la variabilidad estacional del bosque templado, el bosque tropical caducifolio, el matorral y el pastizal de la región central de México, a través de series de tiempo NDVI-AVHRR para el periodo noviembre 1996-abril 2000. La información generada fue comparada con los registros de precipitación y los incendios forestales del periodo en estudio para evaluar su uso potencial como indicador del riesgo de incendios.

Comportamiento fenológico de la vegetación a través de la Percepción Remota

A partir de mediciones radiométricas realizadas en condiciones de laboratorio se han obtenido las curvas espectrales típicas (Chuvieco, 2000) para las principales cubiertas: suelo, agua, vegetación y nieve (Figura 1). Como puede observarse, algunas tienden a presentar una respuesta relativamente uniforme en distintas longitudes de onda, mientras que otras presentan variaciones mucho más selectivas. La nieve presenta una reflectancia alta, pues refleja la mayor parte de la energía incidente a distintas longitudes de onda. Por el contrario, el agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe y por tanto la reflectancia es baja a distintas longitudes de onda. La vegetación presenta un comportamiento espectral muy particular, que está determinado en gran parte por el estado fenológico de las hojas que forman el dosel, su contenido de humedad y densidad de cobertura (*Ibid.*).

La Figura 1 muestra el comportamiento espectral de la vegetación cuando se encuentra en estado óptimo de crecimiento y sin problemas de estrés, es decir, que está vigorosa y sana. La característica más sobresaliente de la vegetación sana es su baja reflectancia en la región del visible (0.4 a 0.7 μm), con un máximo rela-

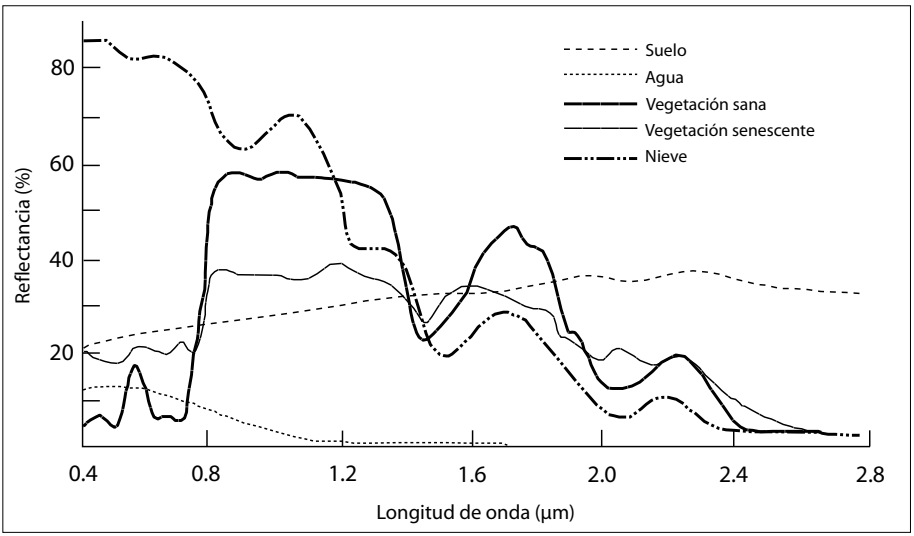


Figura 1. Curvas espectrales típicas para diferentes objetos.

tivo en la porción verde del espectro (0.55 µm). Por el contrario, en el infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 µm) ésta presenta una reflectancia elevada, la cual se reduce en el infrarrojo medio (1.3 a 2.6 µm). La baja reflectancia en el espectro visible se debe a la absorbencia de los pigmentos fotosintéticos que se encuentran en los cloroplastos: clorofilas, xantofilas y carotenos. Todos los pigmentos absorben en la región del azul (0.4 a 0.5 µm); sin embargo, las clorofilas presentan un segundo intervalo de absorción en el rojo (0.6 a 0.7µm). Entre la región del azul y el rojo se encuentra la región del verde (0.5 a 0.6µm), donde los pigmentos reflejan la energía, ocasionando un pico relativo que le da el color característico a la vegetación. La elevada reflectancia en la región del infrarrojo cercano se debe a la estructura del mesófilo (el tejido interno de la hoja), que difunde y dispersa la energía, mientras que las variaciones en la región del infrarrojo medio son resultado del efecto absorbente del agua. El comportamiento espectral de la vegetación varía en función de los cambios fenológicos del follaje. Esto permite distinguir dos comportamientos: uno en la fase de crecimiento (vegetación sana) y otro en la fase de senescencia (vegetación seca; Figura 1). Durante el periodo de crecimiento, la concentración de clorofila aumenta rápidamente, al igual que los espacios intercelulares del mesófilo y el contenido de agua, provocando una menor reflectancia en la región del visible y mayor en la porción del infrarrojo. Por el contrario, en las etapas de senescencia y caída del follaje, la actividad fotosin-

tética disminuye y el agua se pierde poco a poco, ocasionando que la reflectancia aumente en las regiones del azul y el rojo tanto como en la del verde, y disminuya en la del infrarrojo, lo que explica su color amarillento (verde + rojo) y una curva más homogénea (*Ibid*.).

Debido a que la mayor parte de la información espectral de la vegetación se ubica en las regiones del rojo y del infrarrojo cercano (contenido de clorofila y de agua foliar) se generó un parámetro denominado índice de vegetación que combina la información de ambas regiones, logrando minimizar la influencia del suelo y las nubes, obteniendo un valor integrado que facilita la interpretación del estado de la vegetación. Pearson y Miller propusieron el primer índice de vegetación en 1972, el cual es denominado Ratio Vegetation Index (RVI) a partir del cociente entre la banda del infrarrojo cercano y del rojo. En 1974, Rouse y colaboradores formularon el Normal Difference Vegetation Index (NDVI), conocido comúnmente como índice de vegetación normalizado (Gilabert *et al*., 1997). La obtención sistemática del NDVI ha permitido conocer, analizar y comparar los cambios fenológicos de cada tipo de vegetación en relación con las variaciones estacionales de temperatura y precipitación (Justice *et al*., 1985).

El índice de vegetación NDVI

El índice de vegetación NDVI es un parámetro que se obtiene a partir de los valores de reflectancia de las bandas espectrales del rojo (R) y el infrarrojo cercano (IR) de cualquier sensor satelital, cuyo intervalo de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre –1 y +1:

$$NDVI = (IR - R / IR + R) \quad [1.1].$$

Las áreas con vegetación presentan valores positivos de NDVI, mientras que las nubes, los cuerpos de agua y la nieve tienden a registrar valores negativos. Las rocas y el suelo desnudo presentan valores cercanos a cero. A manera de ilustración se pueden utilizar los valores de reflectancia que aparecen en la Figura 1, y calcular el NDVI para diferentes coberturas: vegetación sana: 50 – 7 / 50 + 7 = 0.75, vegetación seca o senescente: 30-12 / 30 + 12 = 0.43 y suelo sin vegetación: 19 – 16 / 16 + 19 = 0.08, nubes: 70 – 85/70 + 85 = -0.9. De esta manera se observa que a mayor diferencia entre la respuesta espectral entre IR y R, el valor de NDVI tiende a valores positivos. Tales diferencias facilitan notablemente la interpretación de diferentes cubiertas. Por ejemplo, se ha señalado como umbral

crítico (valor mínimo) para cubiertas vegetales un valor de NDVI en torno a 0.1 y para la vegetación densa de 0.5 (Holben, 1986). Si bien existen otros índices de vegetación, el NDVI ha sido, por mucho, el más utilizado en las últimas décadas (Gilabert *et al.*, 1997).

Cuando las interferencias atmosféricas son muy fuertes (nubes, vapor de agua, aerosoles, ángulo solar, etc.) el NDVI registra valores muy bajos. Para evitar dichos efectos se ha sugerido construir "compuestos temporales" de NDVI, los cuales agrupan una serie de imágenes y seleccionan todos los píxeles que hayan alcanzado el máximo valor durante el periodo determinado (días, semanas, etc.). El resultado de este procedimiento es una imagen con presencia mínima de nubes; su repetición sistemática genera una secuencia de compuestos denominada "serie de tiempo", que facilitan el análisis multitemporal de las imágenes. Las series de más de un año permiten conocer el comportamiento fenológico estacional e interanual (Holben, 1986).

La interpretación de las series de tiempo del NDVI puede ser cualitativa o por medio de la construcción de gráficas que muestran el comportamiento del NDVI a través del tiempo. La evaluación cualitativa se basa en las diferencias de color. Los colores brillantes están asociados a una mayor actividad fotosintética y biomasa foliar (fase de crecimiento y madurez), en tanto que los oscuros están relacionados con una baja actividad fotosintética y menor densidad foliar (fase de senescencia y caída del follaje). Las gráficas del NDVI facilitan el análisis cuantitativo de los cambios fenológicos en valores de NDVI o tiempos, permitiendo obtener varios parámetros: el inicio de la etapa de crecimiento (emergencia de brotes foliares), las tasas de crecimiento y senescencia, los picos de producción máxima y mínima, y la duración de la etapa de crecimiento, entre otros. La pendiente positiva de la curva, es decir, su fase ascendente, está relacionada con la fase de crecimiento y producción de biomasa, mientras que la pendiente negativa o descendente representa las fases de maduración, senescencia y caída del follaje (Reed *et al.*, 1997).

La construcción de las series de tiempo NDVI-AVHRR ha revelado los patrones fenológicos de varias comunidades vegetales. Es interesante que, en general, éstos muestran una coherencia espacial y temporal con las observaciones fenológicas clásicas (Williams y Meave, 2001). A escala global, las series de tiempo NDVI-AVHRR muestran que el comportamiento fenológico guarda una estrecha relación con las variaciones estacionales de temperatura y precipitación, dependiendo de su ubicación geográfica (Justice *et al.*, 1985). En las regiones tropicales del hemisferio norte, donde se ubica México, la fase de crecimiento se inicia de marzo a mayo (Spanner *et al.*, 1990), mientras que en el hemisferio sur, comienza

al final del año, justo al inicio de la primavera austral (Batista *et al.*, 1997). En la región del Mediterráneo (sur de España y norte de África), la fase de crecimiento se inicia en el otoño (septiembre) y se extiende hasta la primavera, cuando se alcanza el máximo desarrollo foliar (Moulin *et al.*, 1997). A escala regional, las series de tiempo NDVI-AVHRR han logrado describir y caracterizar el patrón fenológico de varios tipos de comunidades, entre los que destacan los pastizales, los matorrales y los bosques estacionales templados y tropicales.

Área en estudio

El área en estudio se localiza en la región central de México. Sus coordenadas extremas son 18°18' a 20°17'N y 98°27' a 100°30' O, e incluye en su totalidad los estados de México, Morelos y al Distrito Federal, así como partes de siete estados colindantes (INEGI, 2000). Cubre una superficie de 41 800 km^2, en un intervalo altitudinal entre 400 y 5 400 m. Domina un relieve montañoso, con varias planicies de diferente extensión (Figura 2). En la parte sur, en altitudes inferiores a 1 800 m, dominan climas cálidos que favorecen el establecimiento del bosque tropical caducifolio y de pastizales. En el centro y norte, en altitudes más altas, prevalecen climas semiáridos, templados y fríos, creando condiciones apropiadas para el establecimiento de matorrales, bosques templados y pastizales (Rzedowski, 1986).

Los diferentes tipos de vegetación mencionados cubren 45% del área en estudio. En la superficie restante se agrupan las áreas agrícolas (50.2%), las de uso urbano y sin vegetación (4.3%) y los cuerpos de agua (0.5%; SEMARNAT, 2001; Figura 2). El bosque templado cubre 22% de la superficie y se distribuye entre 1 200 y 3 600 m de altitud, es una comunidad perennifolia con un estrato arbóreo dominado por diversas coníferas como *Abies religiosa, Cupresssus lindlley, Pinus sp*. y *Quercus sp.* El pastizal representa el 12% del área en estudio y se distribuye en una altitud promedio de 2 400 m, es una comunidad con un estrato herbáceo donde las gramíneas juegan un papel preponderante, por ejemplo: *Bouteloua sp. Muhlenbergia sp. y Buchloë dactyloides*, entre otras. El matorral representa sólo el 1.6% y se distribuye generalmente entre 2 170 y 2 470 m de altitud, es una comunidad con elementos espinosos, rosetófilos y micrófilos, donde se encuentra *Opuntia sp., Mimosa biuncifera y Acacia farnesiana*, entre otras. El bosque tropical caducifolio cubre 9.5% de la superficie y se distribuye en altitudes inferiores a 1 400 m. Esta comunidad se caracteriza por incluir elementos arbóreos que pierden el follaje durante la estación de sequía, la cual incluye como representantes

Bursera sp., Pseudosmodingium perniciosum, Pithecellobium dulce, Carica mexicana y Acacia sp. (Rzedowski, 1986).

Metodología

Registro de imágenes AVHRR- NOAA 14

Las imágenes diurnas AVHRR-NOAA 14 (3:00 a 5:00 PM hora local), del periodo noviembre de 1996-abril de 2000, fueron captadas en la estación receptora TeraScan del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota (LSIGyPR[1] del Instituto de Geografía de la UNAM. Éstas se sometieron a procesos de corrección atmosférica, radiométrica y geométrica utilizando los programas de extracción, calibración y navegación disponibles en la propia estación TeraScan. La corrección radiométrica de los canales 1 (0.58 – 0.68 μm) y 2 (0.72 – 1.10 μm) consistió en convertir los valores digitales de cada píxel a valores de reflectancia. Para ello se utilizaron los parámetros de calibración del satélite y un modelo de corrección atmosférica, los cuales están incluidos en el programa de extracción y calibración de imágenes del sistema TeraScan (Lauritson y Nelson, 1979). La corrección geométrica se realizó con el programa de navegación del sistema TeraScan, cuyo procedimiento consiste en poner la imagen cruda (tal como se capta en la estación) sobre un mapa de México que contiene la línea de costa, las islas y los cuerpos de agua continentales (lagos y presas). Este programa permite efectuar varios ajustes entre la imagen y los límites mencionados utilizando los parámetros denominados *roll* (torsión), *yaw* (giro lateral) y *pitch* (cabeceo), logrando que ambos límites coincidan, aceptando un desfasamiento o error aproximado de dos píxeles para toda la imagen. Las imágenes fueron rectificadas usando una interpolación polinomial bivariante con remuestreo de vecino más cercano para píxeles de 1.1 km. Al final, las imágenes se georreferenciaron en proyección cónica conforme de Lambert. Cada imagen se recortó con las coordenadas extremas del área en estudio. El recorte incluye 200 × 190 píxeles y cubre una superficie aproximada de 41 800 km^2.

Compuestos mensuales de NDVI

El siguiente paso consistió en calcular el NDVI a partir de los valores de reflectancia de las bandas espectrales del rojo (R = 0.58 – 0.68 μm) y el infrarrojo cercano (IR = 0.72 – 1.10 μm), cuyo intervalo de variación, al estar normalizado, queda

[1] Actualmente LAGE-UNAM.

comprendido entre –1 y +1. El producto obtenido fue escalado para obtener valores positivos en un intervalo de 0 a 255, el cual es equivalente a imágenes de ocho bits. Esto se logró sumando 1 al valor de NDVI original (lo que garantiza que siempre se obtengan valores positivos) y multiplicando por una constante de 127, que representa el "0" del intervalo original:

$$\text{NDVI} = [(\text{IR} - \text{R}/\ \text{IR} + \text{R}) + 1] * 127.$$

Antes de construir los compuestos, a cada imagen NDVI se sobrepuso una máscara de nubes, construida mediante el algoritmo de Saunders y Kriebel (1988). Los compuestos se generaron seleccionando el máximo valor de NDVI durante diez días (Holben, 1986), a partir de los cuales se construyeron los compuestos mensuales. Las imágenes resultantes se sobrepusieron al mapa de vegetación y uso del suelo y se obtuvo el valor promedio de NDVI para cada una de las clases de vegetación. Con dichos valores se construyeron las gráficas de evolución temporal de NDVI. El mapa de vegetación y uso del suelo se construyó tomando como base el Inventario Nacional Forestal 2000 (SEMARNAT, 2001). Las numerosas unidades manejadas en el inventario se agruparon en siete clases: bosque templado, bosque tropical caducifolio, matorrales, pastizal, áreas agrícolas, uso urbano o sin vegetación y cuerpos de agua (Figura 2). El análisis multitemporal del NDVI se concentró solamente en las clases de vegetación.

Variabilidad del NDVI y precipitación

La variabilidad mensual del NDVI se comparó con la precipitación mensual registrada en tres estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CNA). Debido a que el NDVI y la precipitación mensual no siguen una distribución normal, se utilizó un método no paramétrico para calcular los coeficientes de correlación de Spearman (Li *et al.*, 2002). Generalmente, hay un periodo de retraso entre las precipitaciones y la respuesta de la vegetación a tales eventos. El intervalo de tiempo entre una lluvia y el lapso en que ésta es aprovechada por la vegetación, puede variar de una a doce semanas dependiendo del tipo de vegetación y del suelo. Debido a ello, el NDVI sigue una tendencia desfasada en relación con la precipitación (Eklundh, 1998). Para cuantificar el intervalo de retraso y evaluar la relación entre ambas variables se empleó la función de correlación cruzada. Esta función estima la correlación existente entre una serie temporal en un tiempo " t " y una segunda serie en un momento "t + k" como función del retardo o tiempo diferencial " k ". La correlación cruzada es particularmente útil para identificar si dos series temporales están correlacionadas entre sí, y en caso

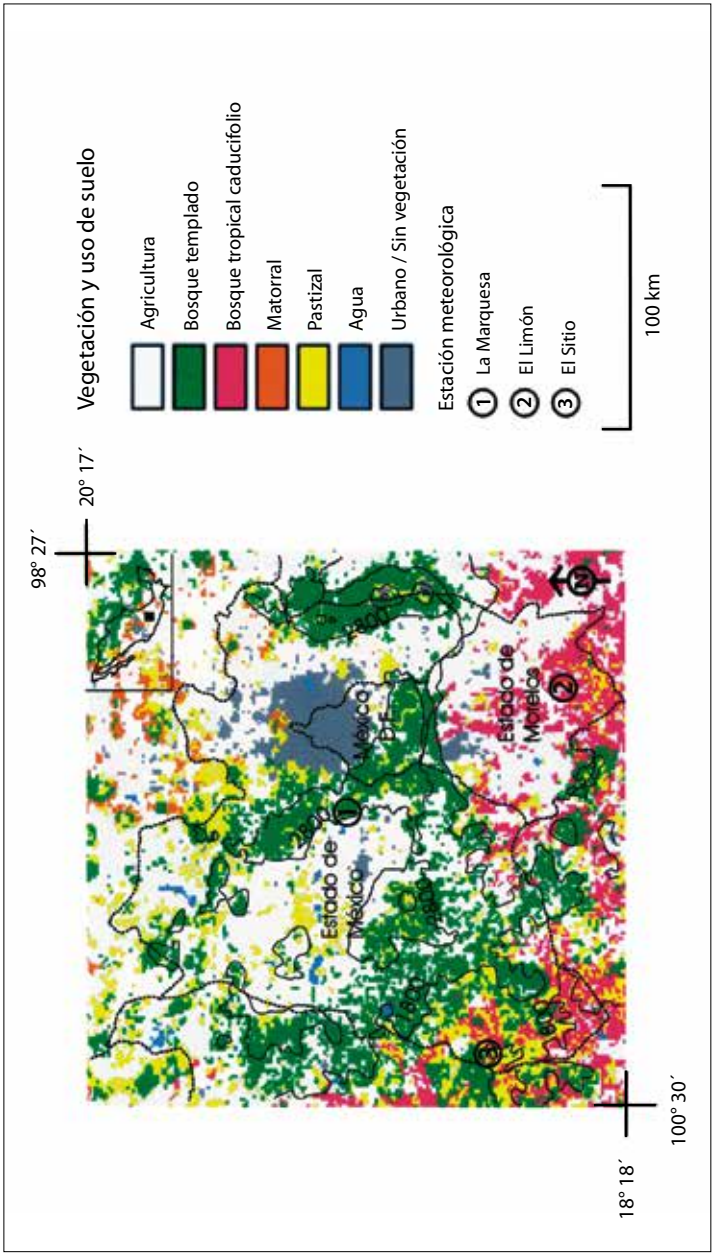


Figura 2. Vegetación y uso del suelo del área en estudio. Las líneas continuas representan las curvas de nivel en intervalos de 1 000 m. Las líneas punteadas son los límites estatales.

de estarlo, para determinar si una de ellas conduce a la otra (Bisquerra, 1989). La precipitación fue seleccionada como la primera serie temporal; en tanto que el NDVI fue designado como la segunda serie. El coeficiente de correlación de Spearman se calculó aplicando 0, 1 y 2 meses de retraso para la segunda serie. El valor máximo fue seleccionado como el coeficiente de correlación de cada estación.

Las estaciones meteorológicas fueron seleccionadas considerando el comportamiento estacional del NDVI de los tipos de vegetación del área en estudio. La estación La Marquesa (Figura 2) se eligió como ejemplo del bosque templado, ésta se ubica en el Estado de México, a 2 989 m de altitud. La estación El Limón, fue seleccionada para el bosque tropical caducifolio, ésta se localiza en el estado de Morelos, a 1 400 m de altitud. La estación El Sitio se eligió para estudiar el pastizal, ubicada en el Estado de México, a 1 090 m de altitud (Figura 2). Así, los coeficientes de correlación de Spearman se calcularon entre la precipitación y el NDVI mensual para el periodo noviembre de 1997-abril de 2000.

Resultados

Variabilidad estacional del NDVI

El NDVI siguió dos tendencias bien definidas, una en la época seca (Figura 3a) y otra en la lluviosa (Figura 3b), las cuales se relacionan con las características estacionales y fenológicas de las comunidades vegetales del área en estudio. En la Figura 3a, siguiendo una secuencia de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, se observa que el NDVI siguió una tendencia decreciente desde el inicio de la época seca (noviembre) hasta el final de ésta (abril); mientras que en la época lluviosa siguió una tendencia creciente de mayo hasta agosto. A partir de septiembre la tendencia cambia a decreciente, continuándose con la siguiente época seca (Figura 3b).

Las curvas de evolución temporal de NDVI para cada tipo de vegetación muestran un patrón diferente que se relaciona con las características estacionales y fenológicas de las comunidades vegetales del área en estudio (Figura 4). De manera general, se observa que en la época seca el NDVI promedio varía entre 154 y 183; en tanto que, en la lluviosa se incrementa entre 167 y 193 (Tabla 1).

En la parte sur del área en estudio, en altitudes inferiores a 1 800 m, dominan climas cálidos que favorecen el establecimiento del bosque tropical caducifolio y de pastizales, los cuales presentan un intervalo muy amplio de NDVI entre una estación seca y la lluviosa, el cual varía entre 149 y 206 y guarda una estrecha

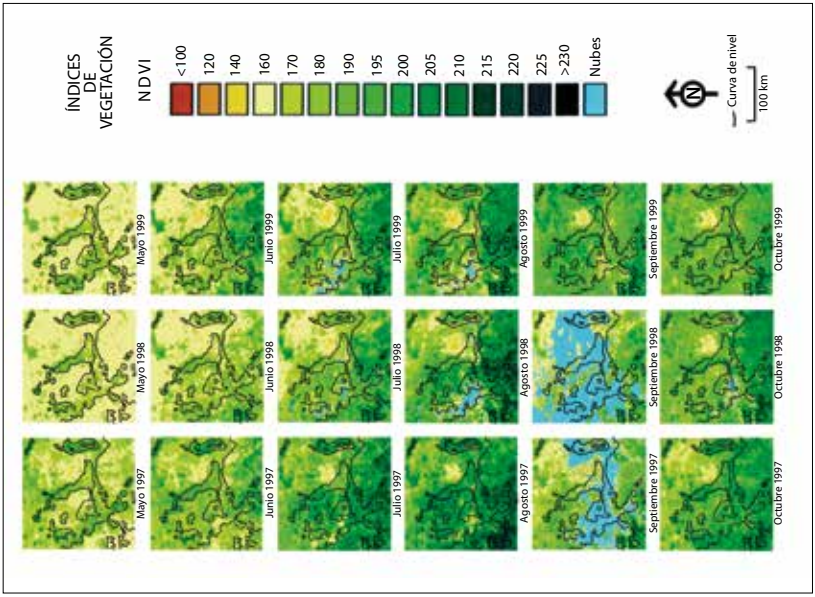


Figura 3b. Compuestos mensuales NDVI-AVHRR mayo-octubre en la región central de México. Épocas lluviosas 1996-2000.

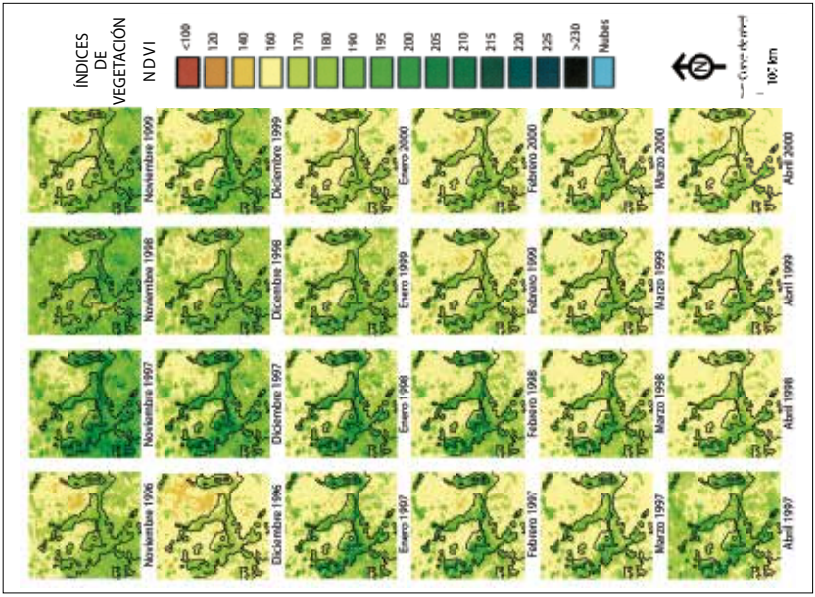


Figura 3a. Compuestos mensuales NDVI-AVHRR noviembre-abril en la región central de México. Épocas secas 1996-2000.

Tabla 1. NDVI promedio, mínimo y máximo por tipos de vegetación en las épocas secas y lluviosas del periodo 1996-2000

Tipo de vegetación	Época seca		Época lluviosa		Intervalo anual					
	(nov 96 - abr 97)		(may 97- oct 97)		(nov 1996 - oct 1997)					
	Promedio	σ	Promedio	σ	Mín.	σ.	fecha	Máx.	σ	fecha
Bt	177	6	190	8	167	9	dic 96	197	13	ago 97
Btr	160	6	193	17	151	7	dic 96	206	7	ago 97
M	156	7	176	4	147	7	dic 96	182	9	ago 97
Pz	161	5	185	12	153	9	dic 96	197	12	ago 97
	(nov 97 - abr 98)		(may 98 - oct 98)		(nov 1997 - oct 1998)					
	Promedio	σ	Promedio	σ	Mín.	σ	fecha	Máx.	σ	fecha
Bt	183	7	178	7	166	11	may 98	190	9	nov 97
Btr	168	12	188	22	149	4	may 98	203	10	ago 98
M	159	5	167	12	153	5	may 98	184	6	ago 98
Pz	167	8	177	14	153	7	may 98	188	16	ago 98

Continuación

	(nov 98 - abr 99)		(may 99 - oct 99)		(nov 1998 - oct 1999)					
	Promedio	σ	Promedio	σ	Mín.	σ	fecha	Máx.	σ	fecha
Bt	176	3	179	5	171	11	may 99	184	13	sep 99
Btr	166	12	189	18	153	5	may 99	201	9	ago 99
M	159	7	171	14	153	6	abr 99	188	7	sep 99
Pz	164	8	178	12	156	8	may 99	188	10	sep 99
	(nov 99 - abr 00)		(may 00 - oct 00)		(nov 1999 - oct 2000)					
	Promedio	σ			Mín.	σ	fecha			
Bt	172	5			167	12	abr 00			
Btr	161	12			147	5	abr 00			
M	154	5			149	6	mar 00			
Pz	159	7			152	9	abr 00			

Bt = Bosque templado
Btr= Bosque tropical caducifolio
M = Matorral
Pz = Pastizal

Mín. = Mínimo
Máx = Máximo
σ = Desviación estándar

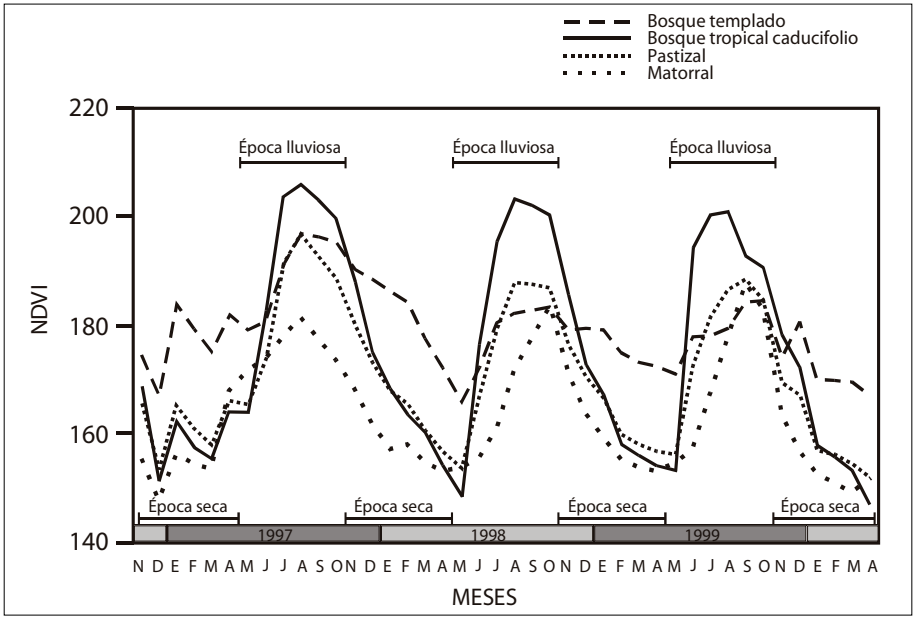


Figura 4. Tendencia del NDVI para cuatro tipos de vegetación del área en estudio.

relación con el incremento y la disminución de la superficie foliar de las diversas especies caducifolias que componen estas comunidades (Tabla 1 y Figura 4). Este resultado es el esperado y muestra semejanza con los reportados por Reed *et al.* (1994).

En el centro y norte, en altitudes superiores a los 1 800 m, prevalecen climas semiáridos, templados y fríos, creando condiciones apropiadas para el establecimiento del matorral, del bosque templado y del pastizal. El matorral sigue un patrón fenológico estacional semejante al bosque tropical caducifolio y al pastizal, pero con un intervalo menor de NDVI entre 154 y 188 (Tabla 1 y Figura 4), el cual es característico de las comunidades xerófilas como ha sido descrito en otros estudios (*Ibid.*). Como resultado del análisis empírico se observó que el patrón fenológico del bosque templado registra un NDVI máximo en la estación lluviosa, entre 184 y 197, que desciende entre 171 y 167 durante los meses fríos y secos; esto representa una disminución (< 30) en comparación con las comunidades caducifolias (> 30). Este patrón estacional es como se esperaba, el cual es característico de las comunidades perennifolias templadas, como ha sido descrito en otros trabajos (Spanner *et al.*, 1990; Reed *et al.*, 1994).

Durante la época lluviosa (mayo-octubre) de 1997, los umbrales máximos de NDVI alcanzaron los valores más altos en comparación con los registrados en las épocas respectivas de 1998 y 1999. Durante este año el bosque tropical caducifolio obtuvo el registro más alto con 206 unidades, siguiendo en este orden el pastizal con 197, el matorral con 182 y el bosque templado con 197 unidades de NDVI. Tales cambios fueron inducidos muy probablemente por los incrementos de temperatura ocasionados por el fenómeno ENOS 1997-1998 (Manzo *et al.*, 2004), los cuales favorecieron un mayor desarrollo y crecimiento foliar, logrando rebasar los umbrales máximos del NDVI.

Después de la época lluviosa de 1997 continuó una intensa sequía donde el NDVI siguió una evolución decreciente que se prolongó hasta mayo de 1998, provocando que el NDVI excediera el umbral mínimo de 1997 (149-166) en todos los tipos de vegetación (Tabla 1 y Figura 4). Tal situación fue ocasionada por la fase final del ENOS 1997-1998, la cual favoreció el inicio y propagación de múltiples incendios forestales. La presencia de La Niña a principios de julio de 1998 contrarrestó los efectos del ENOS, logrando que los umbrales máximos y mínimos de NDVI cambiaran nuevamente (Tabla 1 y Figura 4). De esta manera se puede observar que la variabilidad interanual del NDVI puede ser un indicador importante para predecir la ocurrencia de incendios.

NDVI y precipitación

De manera preliminar se esperaba que el NDVI estuviera relacionado con la precipitación porque el agua es un factor crítico para el desarrollo, madurez y senescencia foliar. La lluvia también mantiene la humedad del suelo y la disponibilidad del agua para la vegetación. Los coeficientes de correlación de Spearman se calcularon para cada estación meteorológica. Los mejores coeficientes se obtuvieron considerando periodos de doce meses (noviembre-octubre) con un mes de retardo en la serie temporal de NDVI (Tabla 2).

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Spearman para la precipitación y el NDVI

Estación meteorológica	nov 96 - oct 97	nov 97 - oct 98	nov 98 - oct 99
La Marquesa (Bosque templado)	0.85	0.49	0.49
El Sitio (Pastizal)	0.89	0.96	0.92
El Limón (Bosque tropical caducifolio)	0.94	0.83	0.74

Los coeficientes de correlación calculados para la precipitación y el NDVI indicaron que la correlación es significativa con $p < 0.05$ en 79% (7 de 9) de los periodos estacionales analizados (Tabla 2). Las estaciones de El Sitio y El Limón presentaron los valores más altos. Estos resultados sugieren una buena correlación entre la precipitación y los valores de NDVI registrados por el pastizal y el bosque tropical caducifolio (Figura 5), como ya ha sido reportado en otros estudios (Li *et al.*, 2002). En la estación La Marquesa, representante del bosque templado, la mejor correlación se obtuvo para el primer periodo; las restantes fueron muy bajas. Durante los meses de agosto y septiembre de 1998 y 1999 se registró una mayor precipitación (363-436 mm), la cual fue casi el doble en comparación con los otros meses; sin embargo, los valores de NDVI no se incrementaron en la misma proporción, sino que disminuyeron (Figura 5). Se considera que la combinación entre una mayor precipitación y menor NDVI muy probablemente fue lo que ocasionó que los coeficientes de correlación registraran un valor menor del esperado. El incremento de la precipitación en 1998 se atribuyó al fenómeno de La Niña, que es más frío y húmedo que el ENOS, la disminución del NDVI en esta misma época muy probablemente forma parte de los daños provocados al dosel forestal por los numerosos incendios ocurridos en la temporada anterior.

En la Figuras 5 se puede analizar mejor la relación entre la precipitación y el NDVI mensual en las tres estaciones meteorológicas. De manera general se observa que existe un retraso de un mes entre la precipitación y el NDVI. Las estaciones de El Sitio y El Limón presentan una mejor relación entre dichas variables tanto en la época seca como en la lluviosa, confirmando la dependencia del bosque tropical caducifolio y el pastizal con respecto al volumen de precipitación, notándose también que a mayor precipitación, mayor NDVI. También se observa claramente en las gráficas la baja correlación reportada para la estación La Marquesa, representativa del bosque templado.

Las correlaciones entre la precipitación y el NDVI, considerando periodos de doce meses, fueron significativa con $p < 0.5$ para el bosque tropical caducifolio y el pastizal. Esto mismo se cumplió para el bosque templado solamente en el periodo de noviembre 1996 a octubre 1997. Estos resultados sugieren que las variaciones climáticas constituyen un factor importante que regula los cambios fenológicos de la vegetación. Aunque un periodo de tres años es muy corto para analizar los efectos de los cambios climáticos, fue importante para conocer los efectos ocasionados por el ENOS 1997-1998, considerado el más intenso del siglo pasado. Debido a ello, el monitoreo mensual del NDVI representa una alternativa de gran utilidad para evaluar la variabilidad climática interanual y puede propor-

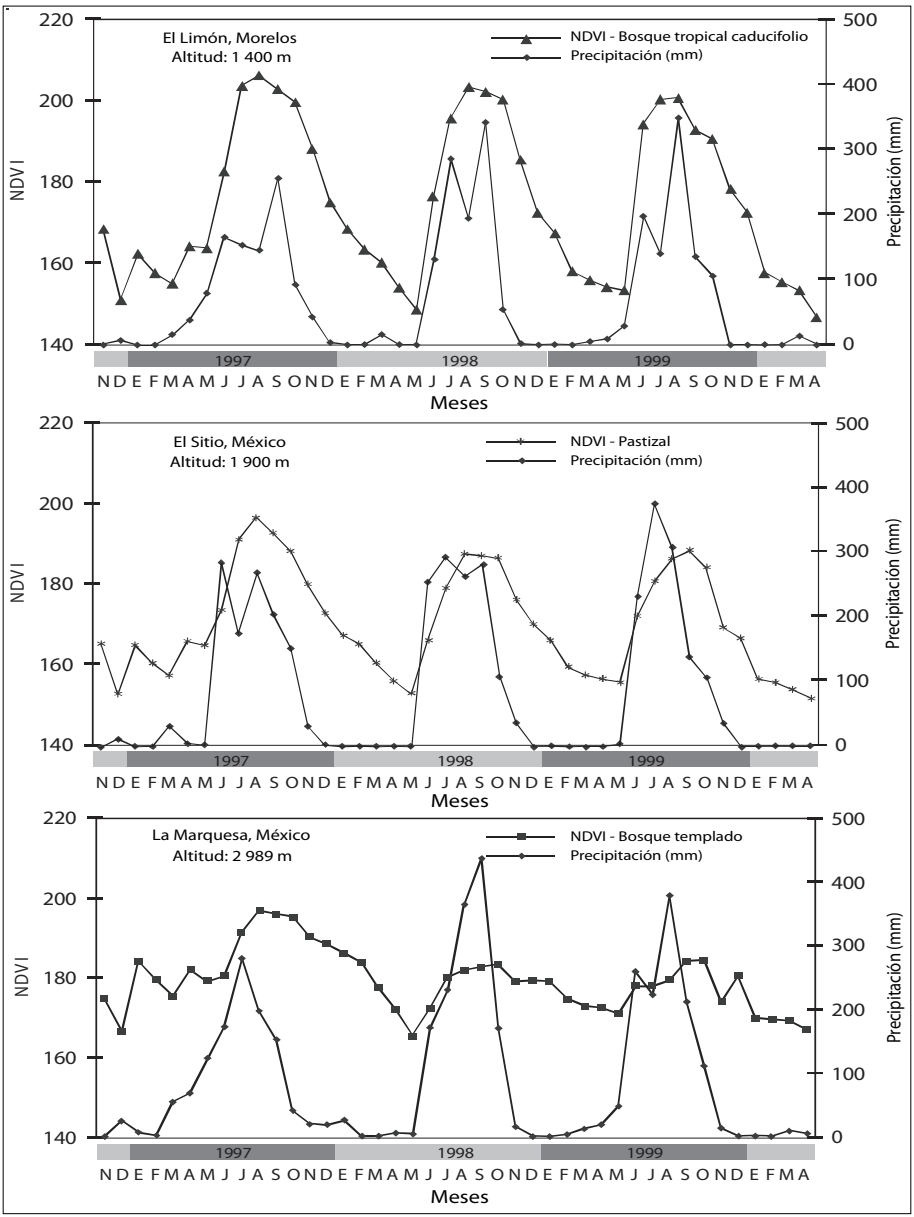


Figura 5. Precipitación y NDVI mensual para el periodo noviembre 1996-abril 2000 en estaciones meteorológicas representativas del bosque tropical caducifolio (arriba); pastizal (centro) y bosque templado (abajo).

cionar información equivalente a la de los registros obtenidos en las estaciones meteorológicas.

Conclusiones

La evolución temporal del NDVI-AVHRR permitió visualizar el patrón fenológico interanual de cada tipo de vegetación del área en estudio: bosque templado, el bosque tropical caducifolio, el matorral y el pastizal. Cada uno de éstos sigue una tendencia decreciente en la época de sequía (noviembre-abril) con promedios entre 154 y 183 NDVI, que cambia a una tendencia creciente durante las lluvias (mayo-octubre), con un incremento de los promedios entre 167 y 193 NDVI.

Además, las variaciones del NDVI se correlacionaron con las condiciones climáticas que se registran en las estaciones meteorológicas. Los resultados de esta correlación indican que el NDVI respondió a los cambios de precipitación con un mes de retraso. Las correlaciones entre la precipitación y el NDVI para el bosque tropical caducifolio (estación El Limón) y el pastizal (estación El Sitio) presentaron un valor de $r > 0.7$, considerándose significativas con $p < 0.5$. Sin embargo, el bosque templado (estación la Marquesa) sólo presentó una correlación significativa para el periodo noviembre de 1996-octubre de 1997 y para los periodos posteriores se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.49. Tal situación fue propiciada porque, a pesar de que la precipitación entre agosto y septiembre de 1998 y 1999 fue de casi el doble que en otros años (363-436 mm), el NDVI no respondió en la misma proporción, manteniendo valores máximos entre 184 y 189. Esto sugiere una especie de saturación para el NDVI, que habría que considerar en ciertas circunstancias.

El fenómeno ENOS 1997-1998 ocasionó cambios en el patrón fenológico de la vegetación, modificando los umbrales máximos y mínimos de NDVI durante la época lluviosa de 1997 y la seca de 1998, cuyas modificaciones fueron mayores para el bosque templado sobrepasando ambos umbrales en comparación con los otros años entre 7 y 13 unidades. En abril y mayo de 1997, el NDVI promedio para la cobertura forestal fue de 170; el año siguiente (bajo la influencia del ENOS) el NDVI promedio disminuyó a 157; en 1999 (en presencia de La Niña) el NDVI aumentó a 159. Estos resultaron sugieren que el NDVI promedio para los meses de abril y mayo podría ser considerado como un indicador de las anomalías climáticas.

Referencias

Batista, G. T., Y. E. Shimabukuro and W. T. Lawrence (1997), "The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonia region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, no. 18, pp. 3195-3210.

Birky, A. K. (2001), "NDVI and a simple model of deciduous forest seasonal dynamics", *Ecological Modeling*, no. 143, pp. 43-58.

Bisquerra, R. (1989), *Introducción conceptual al análisis multivariable*, Promociones y Publicaciones Universitarias, Barcelona.

Chuvieco, E. (2000), *Fundamentos de Teledetección Espacial*, 3ª ed., Rialp, Madrid.

Eklundh, L. (1998), "Estimating relations between AVHRR NDVI and rainfall in East Africa at 10-day and monthly time scales", *International Journal of Remote Sensing*, no. 19, pp. 563-568.

Gilabert, M. A., J. González-Piqueras y J. García-Haro (1997), "Acerca de los índices de vegetación", *Revista de Teledetección* núm. 8, pp. 35-45.

Granados-Ramírez, R. (1998), "Monitoreo del desarrollo de cultivos de temporal en la Mesa Central de Guanajuato, México, usando imágenes NOAA AVHRR", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 36, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 45-55.

Holben, B. N. (1986), "Characteristics of maximum value composite image from temporal AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, no. 7, pp. 1417-1434.

INEGI (2000), *Modelo digital del terreno*, escala 1:250 000, Cartas Ciudad de México, Morelia, Cuernavaca, Chilpancingo, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes.

Justice, C. O., J. R. G. Townshend, B. N. Holben and J. Tucker (1985), "Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data", *International Journal of Remote Sensing,* no. 6, pp. 1271-1318.

Lauritson, L. and G. Nelson (1979), *Techniques for Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Series Satellite Radiometers*, NOAA-NESS Publication # 107, July, Washington, D.C.

Lee, R., F. Yu and K. P. Price (2002), "Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis", *International Journal of Remote Sensing*, no. 23, pp. 2505-2512.

Li, B., S. Tao and R. W. Dawson (2002), "Relation between AVHRR NDVI and ecoclimatic parameters in China", *International Journal of Remote Sensing*, no. 23, pp. 989-999.

Li, Z. and M. Kafatos (2000), "Interanual variability of vegetation in the United States and its relation to El Niño/Southern Oscillation", *Remote Sensing of Environment*, no. 71, pp. 239-247.

Manzo-Delgado, L., R. Aguirre-Gómez and R. Álvarez (2004), "Multitemporal analysis of land surface temperature using NOAA-AVHRR: preliminary relationships between climatic anomalies and forest fire", *International Journal of Remote Sensing*, no. 25, pp. 4417-4423.

Moulin, S., L. Kergoat, N. Viovy and G. Dedieu (1997), "Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements", *Journal of Climate*, no. 10, pp. 1154-1170.

Reed, B. C., J. F. Brown, D. VanderZee, T. R. Loveland, J. W. Merchant and D. O. Ohlen (1994), "Measuring phonological variability from satellite", *Journal of Vegetation Science*, no. 5, pp. 703-714.

Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schnell and D. W. Deering (1973), *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*, NASA/GSFC Type II, Progress report, Greenbelt, Maryland.

Rzedowski, J. (1986), *Vegetación de México*, Limusa, México.

Saunders, R. W. and K. T. Kriebel (1988), "An improved method for detecting clear sky and vegetation types in the 8-14 μm wave band: analysis of two field methods", *Remote Sensing of Environment*, no. 59, pp. 490-521.

SEMARNAT (2001), "Inventario Nacional Forestal", escala 1:250 000, *Cartas Ciudad de México, Morelia, Cuernavaca y Chilpancingo*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Spanner, M. A., L. L. Pierce, S. W. Running and D. Peterson (1990), "The seasonality of AVHRR data of temperate coniferous forests: relationship whit leaf area index", *Remote Sensing of Environment*, no. 33, pp. 97-112.

Williams-Linera, G. y J. Meave (2001), "Patrones fenológicos", en Guariguata, M. y G. Catan (comps.), *Ecología y Conservación de Bosques Neotropicales*, Libro Universitario Regional, Cartago, pp. 407-432.

Capítulo 10. Modelos Digitales de Terreno: atributos primarios y secundarios

Verónica Ochoa Tejeda
Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México

Jean-François Parrot
Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE)
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Parámetros topográficos

Los MDT se usan ahora de manera intensa, en razón de las capacidades de almacenamiento y de los avances recientes en la tecnología informática. La resolución horizontal y vertical permite hacer cálculos precisos. El análisis digital del terreno (Wilson y Gallant, 2000) representa una herramienta poderosa y extrae atributos primarios tales como la pendiente, el aspecto (o orientación de las pendientes), los perfiles de curvatura, etc., y atributos secundarios relacionados con estudios dinámicos como la vulnerabilidad a los procesos de erosión, la humedad de los suelos, la dirección de los flujos, etc. La mayoría de los atributos primarios se calculan directamente a partir de la superficie de los MDT o provienen del ajuste de una función de interpolación $z = f(x, y)$ a la superficie del MDT con la finalidad de calcular las derivadas de dicha función (Moore *et al.*, 1993b; Mitasova *et al.*, 1996; Florinsky, 1998). Los atributos primarios son indicadores del relieve de una región (Tribe, 1991); se utilizan para describir la morfometría, las cuencas de alimentación, la dirección de los flujos, etc., y para calcular diferentes atributos topográficos (Jenson and Domingue, 1988; Dikau, 1989; Moore *et al.*, 1993a; Dymond *et al.*, 1995; Giles, 1998; Borrough *et al.*, 2000). Pike (2002) hizo un catálogo completo de las publicaciones referentes a esta problemática. Varios *softwares* conciernen al estudio paramétrico de la superficie de los MDT (Moore, 1992; Gallant y Wilson, 2000; Parrot, 2006).

Atributos primarios

Con los datos altimétricos se realizaron varios trabajos (Van Driel, 1989; Raper, 1989; Dikau, 1989; Kraak, 1989; McLaren y Kennie, 1989; Bak y Mill, 1989; Smith *et al.,* 1990; Shetselaar, 1995), utilizando las herramientas modernas en el dominio de los tratamientos de las imágenes y de la infografía (Pratt, 1978; Schweizer, 1987; Plastock y Kalley, 1987; Rogers, 1988; Coster y Chermant, 1989; Motet, 1992; Cocquerez y Philipp, 1995; Voiron, 1995, Woo *et al.*, 1997).

Por ejemplo, el análisis de la estructura de una imagen permite caracterizar los rasgos geomorfológicos a partir de la rugosidad de una superficie (Matsuyama *et al.*, 1983; Cocquerez y Philip; 1994; Philipp y Smadja, 1994; Chorowicz *et al.*, 1995; Wood, 1996).

A. Hipsometría

En primer lugar, se pueden obtener mapas de altimetría con intervalos hipsométricos iguales.

Z7	Z8	Z1
Z6	Z9	Z2
Z5	Z4	Z3

h

64	128	1
32		2
16	8	4

Figura 1. Numeración convencional para calcular la pendiente y las direcciones de flujo.

B. Pendiente y aspecto (orientación)

La pendiente de una superficie se puede definir como el ángulo entre ésta y el plano horizontal. El valor de la pendiente se calcula a partir del valor de la normal a la superficie. Por otro lado, la proyección de la normal sobre un plano horizontal indica su orientación. Existen varios métodos que calculan la pendiente y el aspecto: el método de las superficies bi-cuadráticas (Peet y Sahota, 1985; Philipp y Smadja, 1994; Cocquerez y Philipp, 1995), el método infográfico (Schweizer, 1987) o el filtro de Sobel, entre otros.

En todos los casos, se toman en cuenta las relaciones existentes entre un píxel y sus ocho vecinos (Figura 1). Así se establecen las relaciones que existen entre las altitudes *h* de los píxeles y también las configuraciones que describen.

Por ejemplo:

$$Zx = \frac{\delta z}{\delta x} = \frac{z_2 - z_6}{2h} \qquad Zy = \frac{\delta z}{\delta y} = \frac{z_8 - z_4}{2h} \qquad Zxx = \frac{\delta^2 z}{\delta x^2} = \frac{z^2 - 2z_9 + z_6}{h^2}$$

$$Zyy = \frac{\delta^2 z}{\delta y^2} = \frac{z_8 - 2z_9 + z_4}{h^2} \qquad Zxy = \frac{\delta^2 z}{\delta x \ \delta y} = \frac{-z_7 + z_1 + z_5 + z_3}{4h^2}$$

$$p = zx^2 + zy^2 \qquad q = p + {}^1$$

Con los valores anteriores la pendiente es igual a: $S_{FD} = \sqrt{p}$, mientras que la mayor pendiente en una de las ocho direcciones se calcula de la manera siguiente:

$$S_{D8} = \max \frac{z_9 - z_i}{h\emptyset(i)},$$

donde $\emptyset(i) = 1$ en el caso de los vecinos cardinales y $\sqrt{2}$ en el caso de los vecinos diagonales.

También se puede utilizar el detector de bordes de Sobel utilizando las dos matrices (Sx, Sy) de filtraje siguientes:

$$S1 = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix}, \quad S2 = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\left.\begin{aligned} Sx &= \left[\sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=-N}^{N} S1_{m,n} \cdot A_{i-m,\, j-n}\right] \Big/ \ (8 \text{ x } Ps) \\ Sy &= \left[\sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=-N}^{N} S2_{m,n} \cdot A_{i-m,\, j-n}\right] \Big/ \ (8 \text{ x } Ps) \end{aligned}\right\} \text{con M = N = 1.}$$

Donde A es la altitud del píxel de coordenadas (i,j) y Ps es el tamaño del píxel. En este caso, la pendiente y la orientación (Figuras 2A y 2B) son iguales a:

Pendiente = $\left(a \tan \left(\sqrt{Sx^2 + Sy^2}\right) + 180\right)/\pi$ y *Orientación* = arctang (- Sx, Sy) x *(180/ π)*.

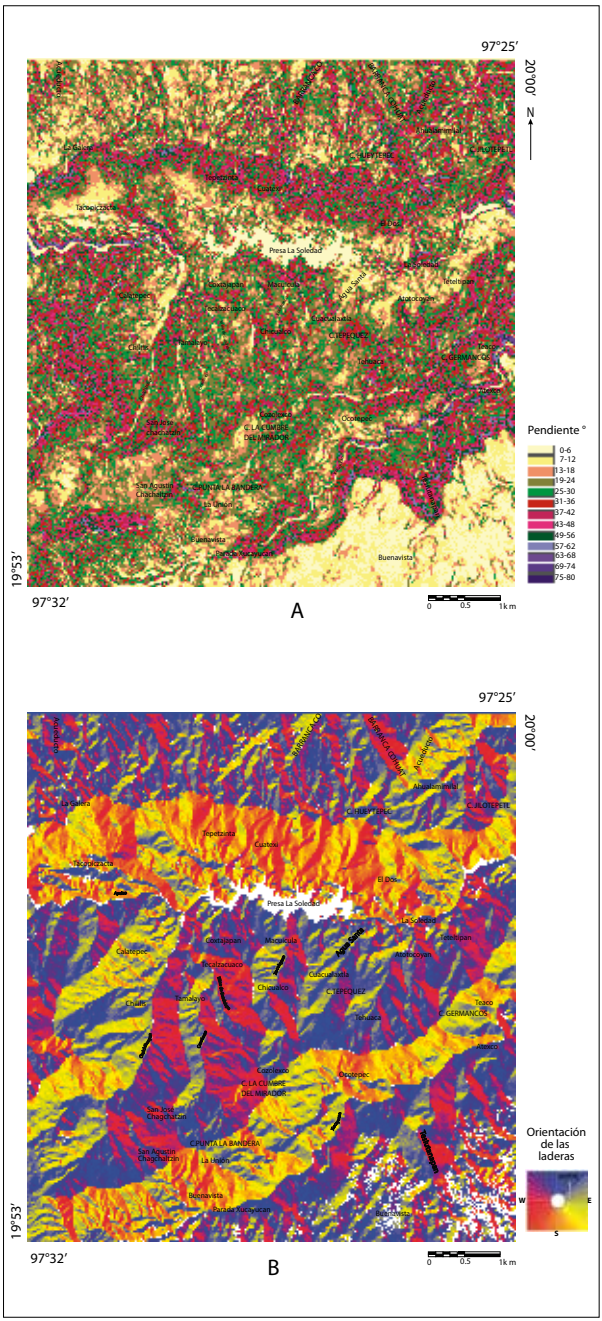


Figura 2. A) ángulo de la pendiente y B) orientación (Sierra Norte de Puebla, en Ochoa, 2004).

C. Sombra, sombra proyectada e iluminación

El cálculo de la sombra presenta la ventaja de simular cualquier posición del Sol. Así se distinguen bien los rasgos morfológicos que no se observan en las imágenes de satélite, debido a que éstas son tomadas en fechas y horas determinadas en el recorrido de la órbita de los satélites y el movimiento de rotación de la Tierra (Figura 3).

La intensidad reflejada I_r se calcula: $I_r = I_i \,.\, K_m \,.\, \cos^n \infty$, donde I_i es la intensidad incidente, K_m un coeficiente de reflexión especular que depende de la naturaleza del material, del ángulo de incidencia y de la longitud de onda. Generalmente, K_m es una constante, n es un coeficiente de brillantez que depende del material. Mientras n sea mayor la superficie será más brillante.

También se puede calcular la iluminación en función de la dirección de la sombra proyectada. El cálculo de las sombras proyectadas se utilizó para calibrar las respuestas de reflectancia de las imágenes de satélite (Parrot *et al.*, 1993). Estos autores propusieron un método basado sobre un modelo elemental en un plano horizontal (x,y); la altitud ($z_{i,j}$) de cada píxel (i,j) se combina con la altitud de los dos píxeles vecinos ($i,j+1$; $i+1,j$) y se define una superficie en la cual se calcula la normal. La reflexión sobre un espejo se describe con la ley de Lambert y el flujo reflejado es proporcional al coseno del ángulo Ø, definido por la dirección del flujo incidente y de la normal a las superficies de reflectancia.

El flujo reflejado l_r es igual a l_i x kd x cosØ, con $0 < Ø < \pi/2$; donde, l_i es el flujo incidente y kd es el coeficiente de difusión.

En esta ecuación de la distribución de la sombra (Figura 4), los píxeles de sombra se codifican con el valor 0, y los píxeles que corresponden a la sombra

Figura 3. MDT sombreado de la región de Vittel (Francia). El: 45°; Az: 45°; píxel: 30 m.

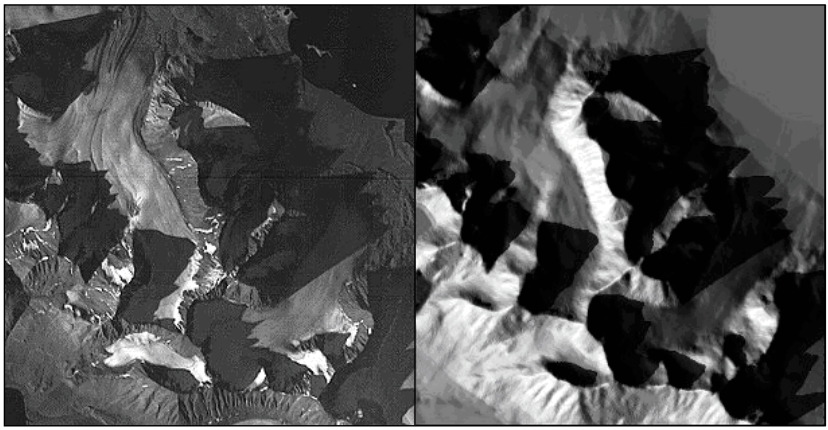


Imagen de satélite Spot Sombras proyectadas

Figura 4. Cálculo de las sombras proyectadas de una zona del Spitzberg (en Parrot *et al.*, 1993).

proyectada se determinan con las siguientes ecuaciones: el valor V de los tonos en gris (entre 0 y 255) corresponde a la relación siguiente entre I_r y I_i: $V = 255 \,.\, I_r / I_i \,.\, 255 \,.\, K_m \,.\, \cos^n \infty$.

Con los resultados provenientes de la sombra proyectada, se calculan también la iluminación o la insolación de una región durante un día, una estación o un periodo de tiempo determinado (Figura 5). Por ello se necesitan calcular las posiciones solares (elevación *El* y azimut *Az*) para cada hora del día o durante un periodo determinado utilizando las expresiones matemáticas siguientes:

$$\sin El = \sin L \times \sin D + \cos L \times \cos D \times \cos H,$$
$$\tan Az = \sin H / \cos H + \sin L - \tan D \times \cos L,$$

donde D es la declinación solar, L la latitud de la zona y H el ángulo horario (15° de longitud equivale a 1 hora).

D. Parámetros de rugosidad

La rugosidad de una superficie sobre el MDT da información sobre los rasgos geomorfológicos de una región. En particular, los tratamientos basados en el análisis de la textura permiten evaluar la rugosidad. Por ejemplo, se calculan a lo largo de un perfil, la media de la raíz cuadrada (*rms roughness*) y la variación de la pendiente *(rms slope*). Los rasgos geomorfológicos como la rugosidad de la super-

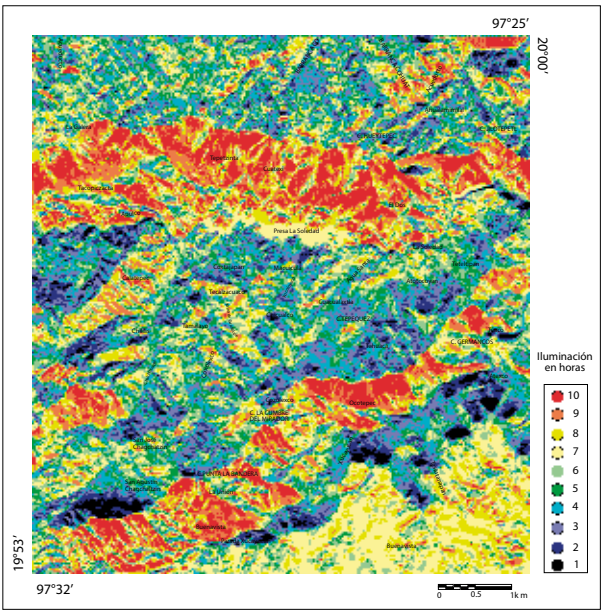


Figura 5. Iluminación durante el 8 de diciembre (Sierra Norte de Puebla, en Ochoa, 2004).

ficie de los MDT dan información sobre la geomorfología regional. Muchos parámetros fueron propuestos para medir la rugosidad (Clarke, 1986; Polidori, 1991; Polidori *et al.*, 1991; Klinkenberg y Goodchild, 1992; Cheng *et al.*, 1999; Xie y Wang, 1999). La dispersión de las normales en cada punto del MDT representa otro método de medida de la textura (Fisher, 1953; Harris y Barrett, 1978). Algunos autores propusieron analizar localmente la superficie utilizando la noción de curvatura (Peet y Sahota, 1985; Saint-Marc y Richetin, 1987; Philipp y Smadja, 1994; Cocquerez y Philipp, 1995). Si el MDT raster no corresponde estrictamente a un modelo de la superficie, es posible desarrollar una expresión de la superficie del MDT utilizando la técnica propuesta por Haralick (1983) o Philipp y Smadja (1994). Por otro lado, el cálculo de los atributos de curvatura tales como k_1, k_2, K_1 y K_2 se obtienen utilizando la superficie bi-cuadrática para clasificar diferentes tipos de superficies (Peet y Sohata, 1985; Besl y Jain, 1986; Coquerez y Philipp, 1995). Mitasova y Hofierka (1993) estiman que *Kt* puede ser útil para medir la convergencia y la divergencia de los flujos, y Dikau (1989) piensa que la curvatura total K delimita las unidades geomorfológicas. Mientras que los métodos de la geometría diferencial (reconocimiento de formas, filtros y análisis texturales) analizan la superficie y sus irregularidades (Besl y Jain, 1986; Peet y Sahota, 1985; Philipp y Smadja, 1994); otros métodos consideran los modelos de

dispersión de las normales de la superficie como medio de la medida de la textura (Fisher, 1953; Harris y Barrett, 1978). Algunos autores utilizan los parámetros de curvatura local de la superficie (Peet y Sahota, 1985; Saint-Marc y Richetin, 1987; Philipp y Smadja, 1994; Cocquerez y Philipp, 1995). Por otro lado, algunas técnicas recientes usan los fractales y los multifractales para mostrar la presencia de artefactos, dar una evaluación de la calidad de los MDT (Polidori, 1991; Datcu *et al*, 1996), o estudiar los fenómenos de erosión (Chen *et al.*, 1989).

Concavidad y Convexidad

La superficie del MDT dibuja zonas cóncavas y convexas desde un punto de vista zenital. Dentro de una ventana móvil de tamaño creciente (de 3 × 3 hasta 7 × 7 o 9 × 9) o dentro de un círculo de diferente radio, los algoritmos buscan los píxeles de valor más alto que el píxel central de la ventana, o los píxeles de la misma altitud, o los píxeles de valor más bajo. Por ejemplo, estos tratamientos se utilizan para verificar la extensión de las laderas y barrancos en un mapa geomorfológico (Figura 6).

Dispersión de las normales

Esta metodología se basa sobre el modelo propuesto por Fisher (1953) y por Harris y Barret (1978), el cual da resultados interesantes a cualquier escala; éstos son similares a los que se originan con los filtros de Laplace y que corresponden a los filtros paso alto que detectan las variaciones de alta frecuencia. Sin embargo, el

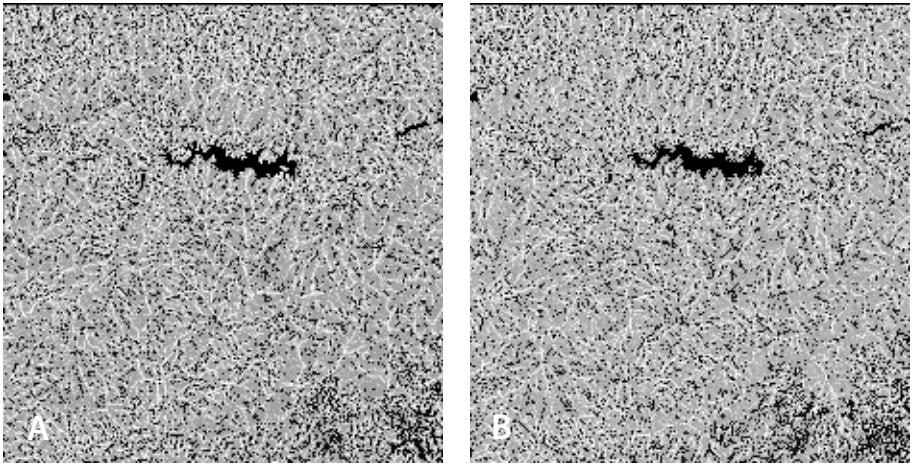


Figura 6. A. convexidad y B. concavidad de la superficie del MDT (Sierra norte de Puebla, Ochoa, 2004).

procesamiento ofrece mejor contraste y permite discriminar fácilmente las diferentes zonas de acuerdo con su rugosidad (Figura 7).

Noción de Curvatura

El cálculo de los atributos de curvatura se basa sobre la tasa de cambio que presentan derivadas del primer orden como la pendiente o el aspecto en una dirección particular. Las dos curvaturas más utilizadas son la curvatura plana K_c (o tasa de cambio del aspecto siguiendo una curva de nivel) y la curvatura de perfil K_p (o tasa de cambio de la pendiente siguiendo una línea de flujo), (Figura 8). También, Mitasova y Hofierka (1993) proponen utilizar la curvatura tangencial K_t (correspondiente a la curvatura plana multiplicada por el seno del ángulo de pendiente).

Dichos atributos se calculan de la siguiente manera:

$$Kp = \frac{z_{xx}z_x^2 + 2z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_y^2}{pq^{3/2}}$$

$$Kc = \frac{z_{xx}z_y^2 + 2z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_x^2}{pq^{3/2}}$$

$$Kt = \frac{z_{xx}z_y^2 + 2z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_x^2}{pq^{1/2}}$$

A veces, se utiliza la curvatura total correspondiente a: $K = z_{xx}^2 + 2z_{xy}^2 + z_{yy}^2$.

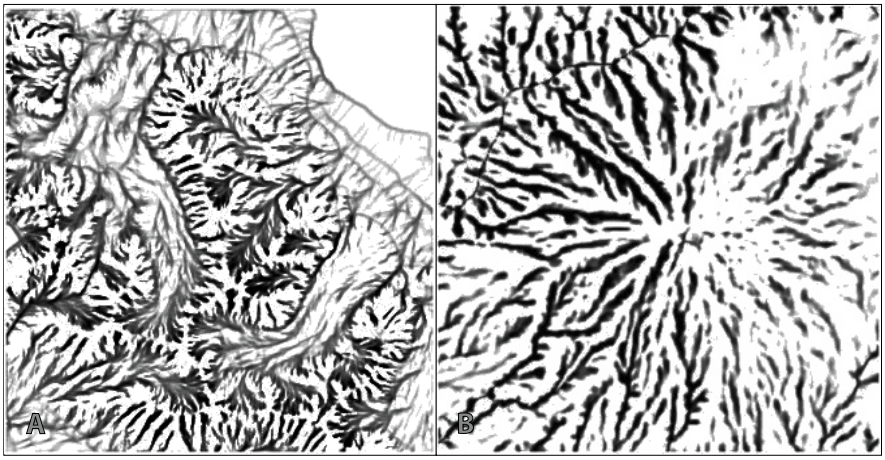


Figura 7. Dispersión de las normales. A. Spitzberg. B. El Misti (Perú).

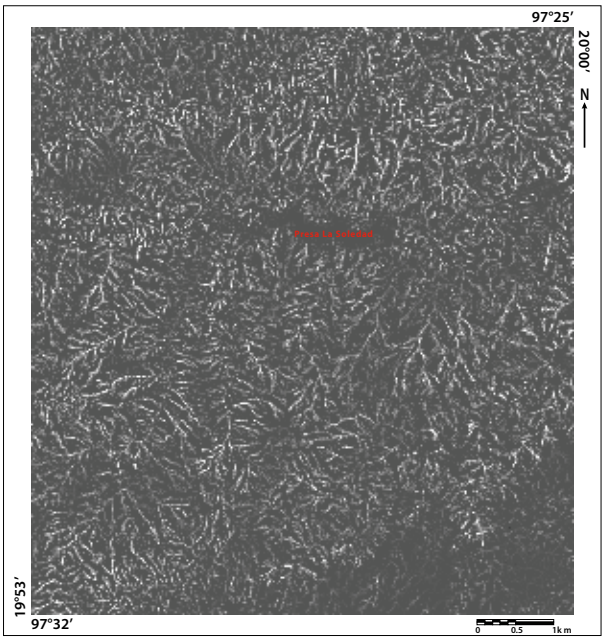


Figura 8. Ejemplo de tratamiento utilizando la curvatura de perfil (en Ochoa, 2004).

Dimensión fractal

La geometría euclidiana no permite medir de manera adecuada los rasgos naturales, como lo hace la geometría fractal, misma que describe la textura y la estructura de manera cuantitativa (Mandelbrot, 1983; Feder, 1988). Existen muchas definiciones de dimensión fractal, las cuales relacionan este parámetro con el grado de irregularidad de los objetos (Pentland, 1984), o con el grado y la heterogeneidad de la ocupación del espacio por éstos (Mandelbrot, 1983; Figura 9). Numerosos trabajos de investigación se han dedicado a desarrollar procedimientos prácticos para calcular la dimensión fractal de diversos sistemas, ya sea naturales o artificiales (Pentland, 1984; Sarkar y Chaudhuri, 1992).

La dimensión fractal de masa (Dm) se calcula utilizando el método de conteo de caja o *box-counting*. Anderson *et al.* (1996, 2000) describen los principios básicos del método de conteo de caja de la siguiente manera: para determinar la dimensión fractal de masa (Dm) de cualquier conjunto de píxeles, basta rellenar la fase de interés con cajas de tamaño progresivamente más grande. Cada caja medirá m × m píxeles. Para cada valor de m se realiza el conteo del número de cajas N(m), ocupadas por la fase de interés. Al incrementarse m, N(m) disminuye. El valor de Dmp o Dms, para cualquier imagen, se define como el inverso de la pendiente de la gráfica LnN(m) *vs*. Ln(m). El cálculo de la dimensión fractal

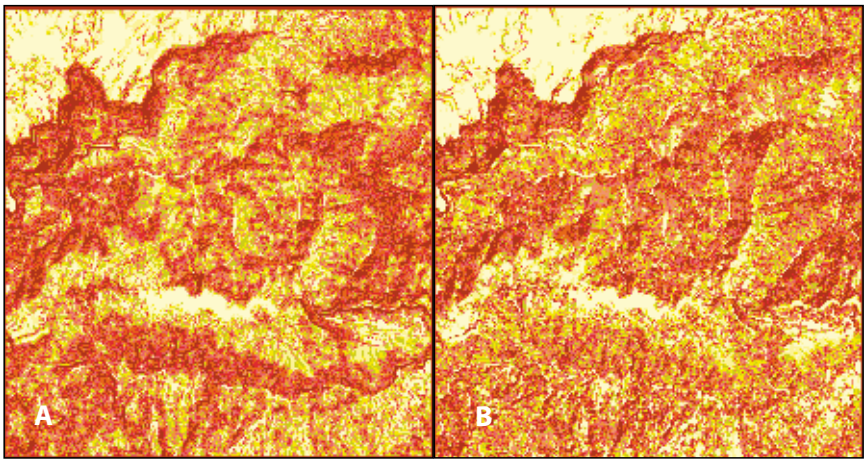


Figura 9. Dimensión fractal local (Taud y Parrot, 2005): A. Equipoblación (cubo de 12 × 12 × 12). B. Equipoblación (cubo de 24 × 24 × 24; en Ochoa, 2004).

local (Taud y Parrot, 2005) que se presenta aquí, se hizo utilizando un cubo de 123 vóxeles y un cubo de 243 vóxeles; el primer resultado subraya los cambios a pequeña escala y el segundo muestra una visión general de los elementos morfológicos constitutivos.

Atributos secundarios

Existen varios *softwares* que calculan atributos secundarios; por ejemplo, EROS, SRAD, WET, DYNWET (Moore, 1992; Wilson y Gallant, 2002) o SINMAP (Park *et al.*, 2001).

El software EROS calcula dos índices de erosión:

- el primero calcula la distribución espacial del material que perdió el suelo como un índice de la capacidad de transporte de los sedimentos;
- el segundo corresponde a una representación de los cambios en la posibilidad de transporte y produce un mapa de la erosión y de la sedimentación.

Existen otras alternativas. Por ejemplo, Calixto y Parrot (2007) calculan el volumen anual de erosión en una cuenca, tomando en cuenta la tasa de erosión en función de la pendiente, la superficie de los píxeles recalculada en el espacio tri-dimensional y la densidad de vegetación (Figura 10).

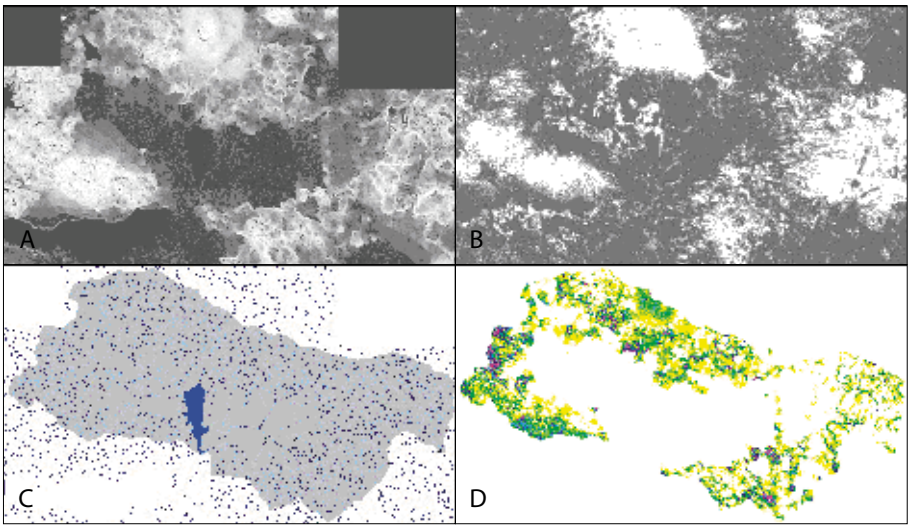


Figura 10. Erosión anual de la cuenca de la presa La Vega (Jalisco). A. pendiente. B. densidad de vegetación. C. red fluvial y cuenca. D. pérdida en suelos.

El *software* SRAD calcula la radiación solar potencial como función de la latitud, la pendiente, la orientación, las sombras proyectadas y la estación del año. Se extrapola la temperatura de la superficie utilizando los métodos de Running y Thornton (1996).

El *software* WET calcula la saturación del suelo tomando en cuenta la precipitación, la evaporación, la densidad de drenaje y la dirección de los flujos de drenaje.

El *software* DYNWET calcula la distribución espacial de la humedad.

El algoritmo SINMAP genera un mapa de las zonas de inestabilidad tomando en cuenta la pendiente, la densidad de drenaje, el índice de saturación de los suelos y el ángulo de fricción. Un acercamiento alternativo (Parrot, 2004a) mide el peso de cada una de estas variables y origina un mapa de inestabilidad tomando igualmente en cuenta el parámetro de densidad de vegetación (Figura 11).

Red fluvial

A. Extracción

La extracción de las redes fluviales a partir de los MDT se describe en muchas publicaciones (Deimel *et al.*, 1982; Abrahams, 1984; Band, 1986; Yuan y Van-

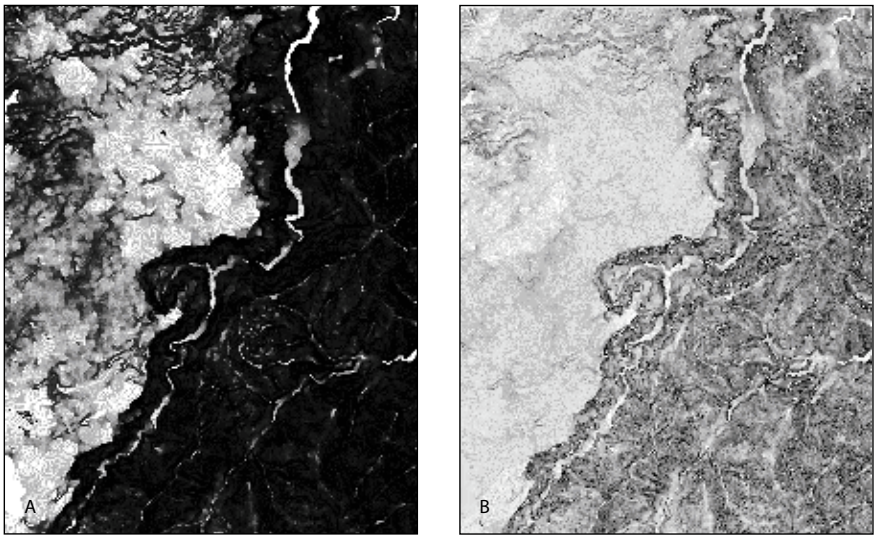


Figura 11. Mapa de sensibilidad de la región de Zacatlán, Puebla (Sánchez, 2004). A. resultado de la aplicación del algoritmo SINMAP (Park *et al*., 2001). B. algoritmo Elo_Sim (Parrot, 2004a).

derpool, 1986; Seemuller, 1989; Hadipriono *et al*., 1990; Smith *et al*., 1990; Jenson, 1991; Tartobon *et al*., 1991; Tribe, 1991; Chorowicz *et al*., 1992; Martz y Garbrecht, 1992; Meiseils *et al*., 1995). Estos tratamientos utilizan diversos procesos: barrido de perfiles sobre el MDT, modelación de los flujos, máximo de la curvatura, cálculo de la acumulación de los flujos (Jenson y Domingue, 1988). Hay una diferencia entre los talwegs y la red hidrológica por lo que existen diferentes topologías que tratan de definir una red fluvial. Para los cartógrafos, la red fluvial es una línea codificada sobre el mapa que corresponde a la presencia de un río dentro de un talweg. El algoritmo propuesto y desarrollado por Parrot (2002) se basa en la proporción de píxeles vecinos más altos del píxel estudiado. Este tratamiento corresponde a una adaptación de la estimación del máximo de la curvatura (Peet y Sahota, 1985; Besl y Jain, 1986; Cocquerez y Philip, 1995). También una esqueletización (O'Gorman, 1990) de la curvatura permite producir redes fluviales.

B. Algunos parámetros provenientes de la red fluvial

Varios parámetros morfológicos utilizan la información proveniente de la red fluvial: jerarquización de los segmentos (Stralher, 1952), patrones describiendo la red (Ichoku *et al*., 1994). Otros parámetros toman en cuenta el espacio tri-

dimensional donde se ubica la red fluvial. En este capítulo se presentarán tratamientos que provienen de los recientes trabajos de Ochoa (2004) y Parrot *et al.* (2008).

a) Longitud de la red

En el modo raster una curva es una secuencia de píxeles. Generalmente se calcula la longitud de la red fluvial tomando en cuenta las distancias que existen entre los centros de los píxeles consecutivos; pero, también se puede considerar dentro de la superficie del píxel, el valor de la línea recta que conecta el centro del píxel al centro del vecino. En este caso, como se muestra en la Figura 12A, y según la configuración encontrada en una ventana de 3 x 3 píxeles, los dos valores D_{z1} y D_{z2} dentro de la superficie del píxel son respectivamente iguales a ½ y $\sqrt{2}/2$.

Si se toma en cuenta el tamaño *Ps* del lado del píxel, la longitud total de la porción *lz* de la red fluvial observada en la ventana de prueba es igual a:

$$l_z + d_z \text{ x } P_s \text{ donde } d_z = \sum d_{z1} + \sum d_{z2}$$

Este cálculo se hace sobre cada píxel que pertenece a la red fluvial, siguiendo el *raw order* y como se muestra en la Figura 13, la longitud total de la red estudiada *Lz* corresponde a la suma de todos los valores locales *lz* obtenidos.

También es posible medir la longitud de la red fluvial en el espacio 3D. Este cálculo, más preciso, requiere integrar los valores de altitud de los diferentes píxeles involucrados. Es decir, se considera que el valor del elemento de la red fluvial proyectado sobre la superficie del píxel, corresponde a la hipotenusa de un triángulo recto con base igual a *lz1* o *lz2* (según la posición de los píxeles vecinos y la descripción anterior); la altura es la diferencia de altitud *H* entre el píxel central y el píxel vecino (Figura 12B).

La longitud de dichos elementos locales l_{3D1} y l_{3D2} es igual a:

$$l_{3D1} = l_{z1} \text{ y } l_{3D2} = l_{z2}\ d_z \text{ si } H = 0$$

$$l_{3D1} = \sqrt{(l_{z1})^2 + (H/2)^2} \text{ y } l_{3D2} = \sqrt{(l_{z2})^2 + (H/2)^2} \text{ si } H > 0 \text{ ,}$$

y la longitud total l_{3D} medida en una ventana 3 x 3 píxeles es:

$$l_{3D} = \sum l_{3D1} + \sum l_{3D2.}$$

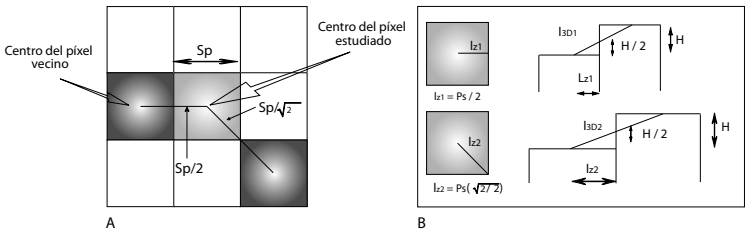


Figura 12. Medida de la distancia. A. Cálculo dentro de la superficie del píxel. B. Cálculo tri-dimensional.

La longitud 3D total L_{3D} corresponde a la suma de todas las longitudes locales l_{3D} calculadas en una ventana de 3 x 3 píxeles y que está centrada sobre cada píxel que pertenece a la red fluvial.

b) Densidad de disección

La manera más sencilla para calcular la densidad dentro de cada celda o dentro de la ventana móvil, consiste en contar el número de píxeles (N_p) que corresponden al tema en estudio (en este caso la red fluvial) y en dividir esta suma por el valor S_v de la superficie de la celda o de la ventana. Esta densidad D_1 normalizada (0, 100) es igual a: $D_1 = (N_p / S_v)$ x *100*. Sin embargo, también es posible hacer un cálculo más preciso, midiendo la longitud total de los cauces L_c presentes en la celda o la ventana móvil, tomando en cuenta el valor del lado L_p y de la superficie S_p del píxel, es decir, el grado de resolución, utilizando un algoritmo capaz de medir un perímetro. En general, se utilizan patrones que permiten calcular con precisión un perímetro en el espacio raster y en el caso de las redes fluviales, la longitud L_c de los cauces.

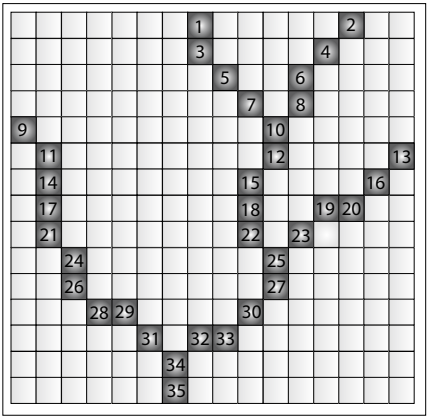


Figura 13. Ejemplo de cálculo de la distancia siguiendo el *raw order*.

La relación que existe entre la longitud L_c de los cauces y la superficie S_t de una celda corresponde al "parámetro de disección" (Lugo, 1988) que se aplica a zonas con una superficie de 16 × 16 km, 4 × 4 o 1 × 1 (Figura 14A). El algoritmo "Disec" (Parrot, 2003) utiliza cualquier tamaño de la superficie S_t , define una malla regular (Figura 19A) o elige ventanas móviles que recorren toda la imagen y dan un valor a cada píxel (Figura 14B).

Tomando en cuenta la longitud de la red fluvial en el espacio 3D, además se mide la densidad de disección (*Dd*). La Figura 15 ilustra la relación existente entre dichos parámetros (Ochoa *et al*., 2002).

c) Dimensión fractal

Especialmente en el mundo raster existe una relación estrecha entre la densidad y la dimensión fractal, la cual traduce la complejidad de la red fluvial y también su expansión en el espacio. El cálculo de la dimensión fractal requiere de ventanas que cubran totalmente el área donde se mide la red fluvial. Dentro de los cuadrantes o de la ventana móvil, la dimensión fractal se calcula con la técnica del *box counting* o conteo de cajas (Figura 16). El resultado (Figura 17) traduce no sólo la invasión del espacio por el tema (relación entre densidad de píxeles y valor de la dimensión fractal (Figura 18), sino también su configuración particular; Parrot y Ochoa, 2002).

d) Profundidad de erosión

La profundidad de erosión es el reflejo de un proceso de tiempo determinado, con mayor intensidad en unas zonas que en otras, en función de las condiciones litológicas, estructurales, tectónicas y climáticas principalmente (Lugo, 1988).

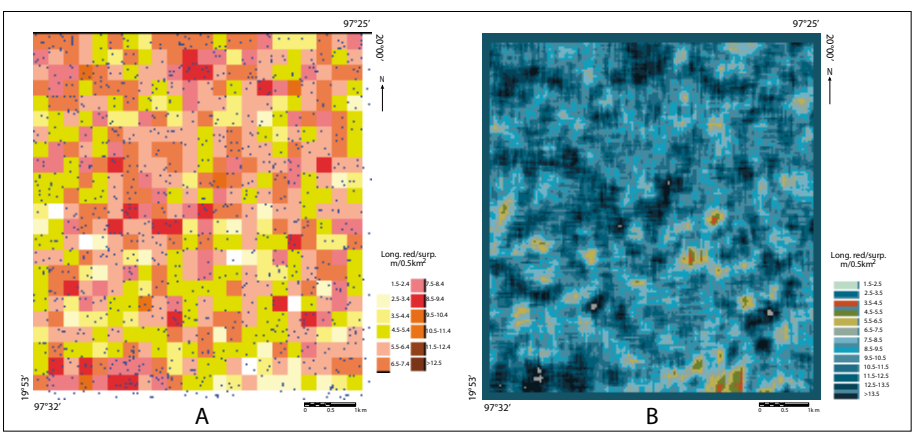


Figura 14. Cálculo de la densidad de disección. A. en celdas. B. utilizando una ventana móvil.

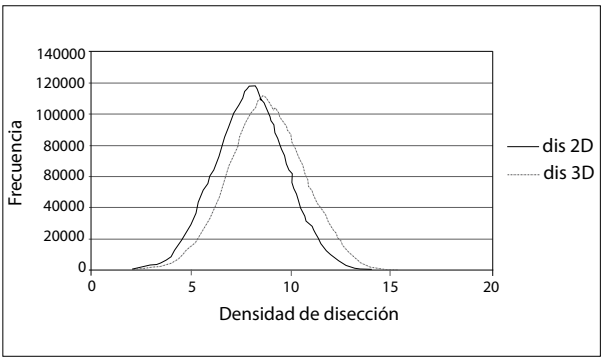


Figura 15. Comparación densidad de disección 2D *vs* 3D.

La profundidad de disección del relieve es un parámetro muy importante por su significado. Los valores más altos son el reflejo de un corte vertical más intenso, lo que normalmente se relaciona con las zonas de actividad tectónica (Figura 19; en Ochoa, 2004). Sin embargo, el cálculo de este parámetro no se puede aplicar a todos los tipos del relieve. Por esta razón, un nuevo algoritmo a incluir en la versión 2 del *software* TLALOC (Parrot, 2006) está en desarrollo.

Tratamientos en el espacio tri-dimensional

Antes de entrar en el mundo de las simulaciones, se presentarán tratamientos que toman en cuenta el espacio 3D. Dos ejemplos ilustran este tipo de acercamiento:

La tomomorfometría

Se trata de una nueva metodología (García y Parrot, 1998) que descompone el objeto tri-dimensional en secciones horizontales sobre las cuales se miden parámetros de Reconocimiento de Patrones, permitiendo seguir su evolución en función de la altitud.

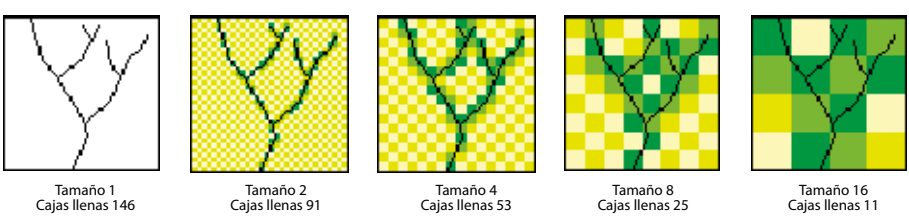


Figura 16. Cálculo de la dimensión fractal utilizando la técnica del *box counting*.

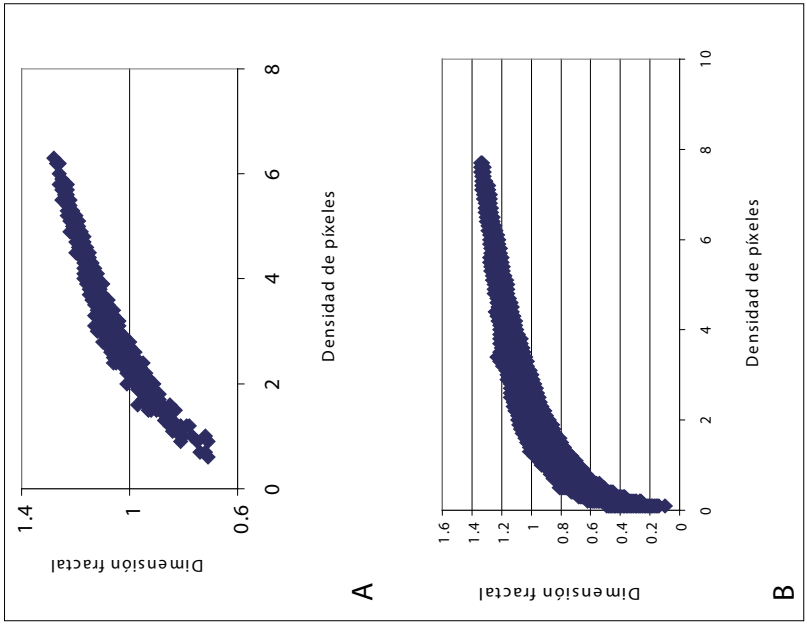


Figura 18. Histogramas bidimensionales densidad de píxeles *vs* dimensión fractal. A. en cuadrantes de 64 x 64 y B. en una ventana móvil del mismo tamaño.

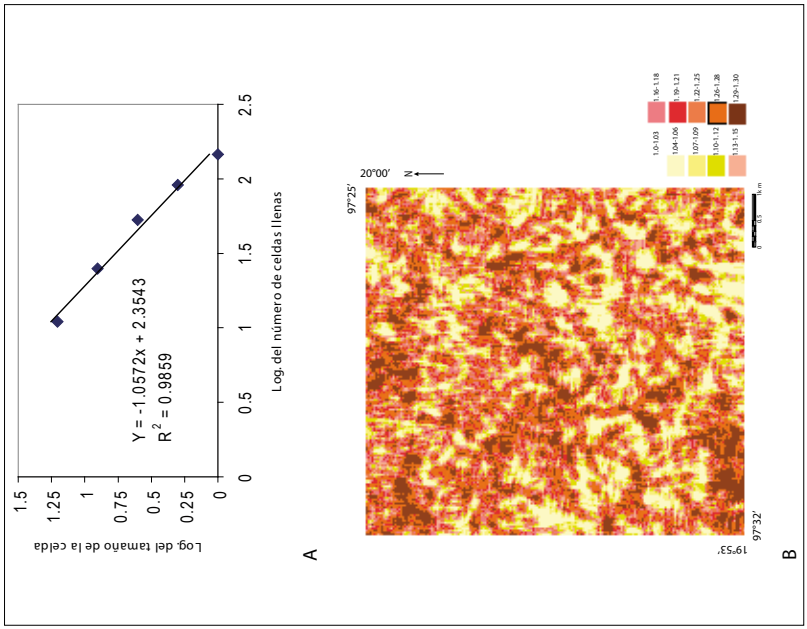


Figura 17. A. ejemplo de cálculo de la dimensión fractal B. equipoblación de la dimensión fractal calculada dentro de una ventana móvil de 64 x 64 píxeles (0.32 km; en Ochoa, 2004).

Entre otros, dentro de los parámetros que permiten caracterizar cada sección, se calculan el índice de convexidad, el valor de la superficie y del perímetro, la relación entre ambos, el índice de elongación y la orientación del eje principal (Parker, 1994).

La superficie de la sección se expresa en número de píxeles (*Nbp*). Un cálculo más preciso (Pratt, 1978) corresponde a la suma de los píxeles de superficie y la suma de la mitad de los píxeles que describen el perímetro; estos últimos se definen utilizando el proceso descrito por Parker (1994). Dos índices se relacionan con el valor *S* de la superficie y el valor *P* del perímetro: la relación *P/S* y el índice de circularidad $\varpi = P2/S$.

Por otro lado, el índice de convexidad es uno de los parámetros importantes del Reconocimiento de Patrones. La fórmula es la siguiente:

$$CI = Nbp/Sc$$

donde *Nbp* es el número total de píxeles encontrados en la forma estudiada y *Sc* el número de píxeles de la zona convexa.

Se calcula la zona convexa utilizando la marcha de Jarvis (Jarvis, 1973) desarrollada por Akl (1979; Figura 20).

Los resultados provenientes del índice *CI* son interesantes (entre más fuerte es el índice, más convexa será la forma), pero la relación *RCI* propuesta por García y Parrot (1998) parece más significativa y más sensible a cualquier irregularidad de la forma. La fórmula es la siguiente:

$$RCI = PCo/P\ ,$$

donde *PCo* es el perímetro de la superficie convexa y *P* el perímetro exterior de la forma.

El cálculo de la orientación del Eje Principal (*EP*) provee una información importante y permite calcular la elongación de la sección estudiada. El Eje Principal pasa por el centro de gravedad *CG* de la forma. Las coordenadas de *CG* son iguales a:

$$X_c = \frac{1}{Nb_p} \sum_{i=1}^{Nbp} X_i \qquad Y_c = \frac{1}{Nb_p} \sum_{i=1}^{Nbp} Y_i,$$

donde Nb_p es el número de píxeles que describen la forma y X_i, Y_i las coordenadas del píxel.

La metodología (Figura 21) fue desarrollada sobre el Misti (Perú).

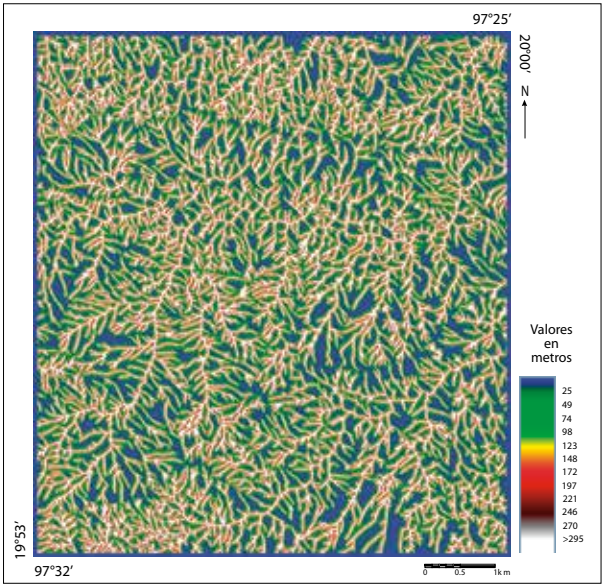


Figura 19. Profundidad de erosión en el espacio 3D (en Ochoa, 2004).

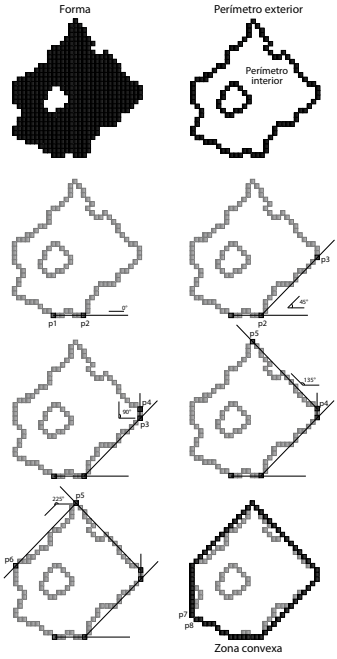


Figura 20. Marcha de Jarvis, algoritmo que calcula la zona convexa que encierra una forma.

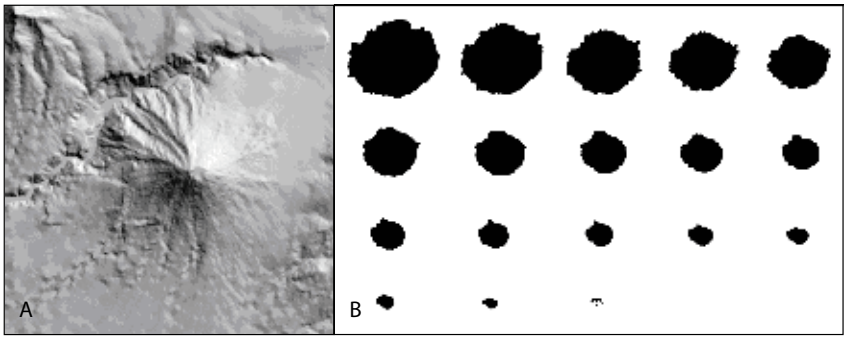


Figura 21. Tomomorfometría del volcán El Misti. A. MDT sombreado. B. secciones altimétricas.

Entre las aplicaciones recientes de esta metodología destacan el estudio de la fracturación de Anatolia oriental a partir de la morfología de los edificios volcánicos (Adiyaman *et al.* , 2003; Figura 22) y el estudio de la erosión de los conos de ceniza del Chichinautzin (Noyola *et al.*, 2003, 2004).

El proceso Voxel Wall

Este proceso (Baudemont y Parrot, 2000) consiste en una representación de una superficie en un espacio 3D real. El principio es el siguiente: se extraen las norma-

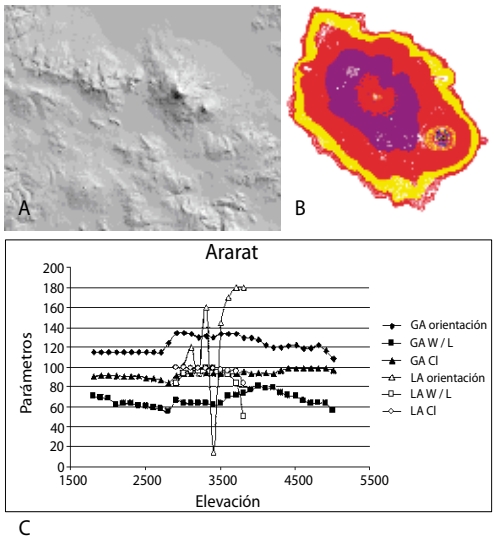


Figura 22. Características morfológicas del Monte Ararat (Anatolia oriental, Turquía). A. MDT sombreado. B. Orientación de las secciones del Monte Ararat. C. Evolución de varios parámetros (orientación, convexidad, relación largo-ancho); en Adiyaman *et al.* (2003).

les de la superficie en cada punto del MDT; éstas se cruzan en vóxeles que juegan un papel de acumulador. El número de cruzamientos y la profundidad donde estos cruzamientos se encuentran, permiten establecer un catálogo de los rasgos en el espacio tri-dimensional (Figura 23).

La distribución de los picos de acumulación permite, entre otros, definir la línea de base de los edificios volcánicos. Existe una distribución característica que no depende de la escala de observación. Los edificios volcánicos presentados en la Figura 24 se ubican respectivamente en Marruecos (Azru), Perú (El Misti), Anatolia oriental (Ararat) y en el planeta Marte (Monte Olimpo).

Simulaciones

Hacer simulaciones a partir de un MDT consiste en modificar la forma observada en función de un objetivo particular. Se presentan en este capítulo algunos ejemplos de tratamiento.

Erosión de los conos volcánicos

Medir el efecto de la erosión o de movimientos en masa que afectan los edificios volcánicos requiere reconstruir el edificio original. La diferencia entre el modelo "original" y el edificio actual da indicación sobre el volumen de materia desplazada, la ubicación de la erosión y la sedimentación. Por otro lado, se obtienen las características de los edificios estudiados (Figura 25).

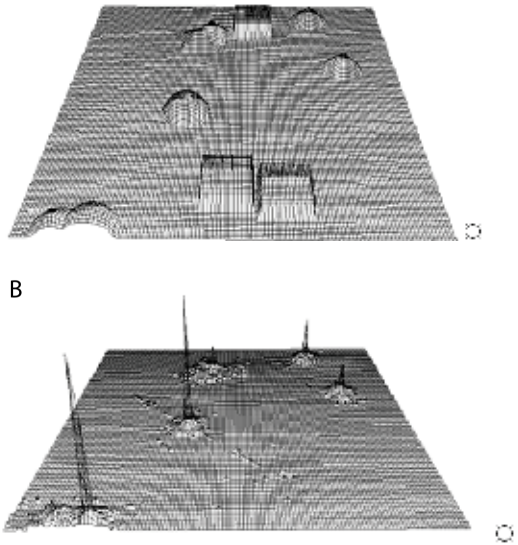
El programa (Parrot, 2007) aplicado al MDT del volcán Jocotitlán con 11 m de resolución, calcula, a partir del valor de la línea de base y de la posición del centro de gravedad: *i)* el volumen global en km^3 y la superficie en km^2 del edificio, *ii)* el promedio de la pendiente exterior, *iii)* el promedio de la pendiente dentro del cráter, *iv)* el radio (mín, máx, elongación) de la línea de base, *v)* el radio (mín, máx, elongación) del cráter, *vi)* la altura total, *vii)* la profundidad del cráter. La misma información se da para el cono reconstruido así como la diferencia de volumen y la ubicación de las zonas colapsadas.

Modelación de las erupciones

El Pinatubo (Las Filipinas) tuvo una erupción importante en 1992, responsable de la formación de lahares, riesgo mayor que afectó toda la zona (Chorowicz *et al.*, 1997). Los MDT hacen previsiones y simulaciones que miden los efectos de los eventos.

	Formas simples	Sección vertical según el eje vertical	Plano horizontal (intensidad)	Posición del máximo
ESFERA				Centro del plano horizontal sobre el cual se ubica el hemisferio
CONO				Debajo del plano horizontal
PIRÁMIDE				Ninguno

A



B

C

Figura 23. Tipología en el espacio 3D. A. Tres formas. B. MDT de síntesis (hemisferios, cubos y pirámides). C. Máximo de acumulación.

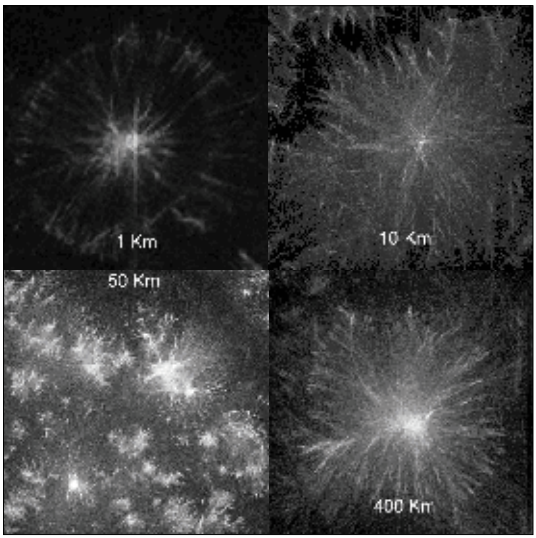


Figura 24. *Voxel Wall* Proceso. Máximo de acumulación.

En los ejemplos reportados aquí se presentan la formación del cráter de explosión y la distribución de las rocas, partículas y cenizas sobre toda la zona en función de la importancia del fenómeno y de la dirección del viento al momento de la erupción.

En la Figura 26 se presentan los resultados de la simulación, así como una comparación entre la formación simulada del cráter y la imagen de radar de la misma zona tomada poco después de la explosión.

El estudio de los depósitos se hizo en función de la dirección de los vientos dominantes al momento del evento (*Ibid.*) y del tamaño de las partículas emitidas durante la explosión (Figura 27). Esta información se sobrepone sobre el MDT sombreado produciendo un mapa detallado de la extensión de dichas partículas.

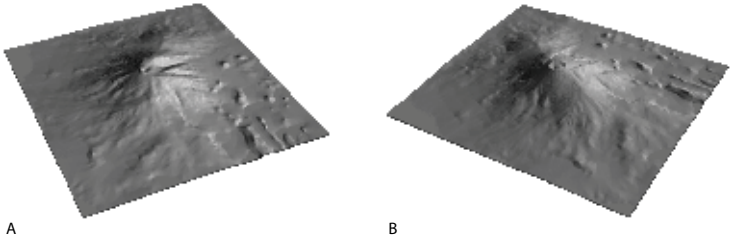


Figura 25. Reconstitución del volcán Jocotitlan después de su colapso norte oeste. A. MDT original. B. cono reconstruido.

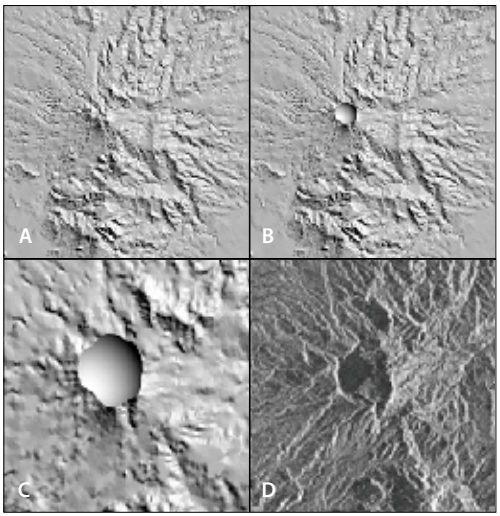


Figura 26. Formación del cráter de explosión. A. MDT anterior a la explosión. B. simulación de la formación del cráter. C. detalle del cráter. D. imagen radar del cráter después de la erupción.

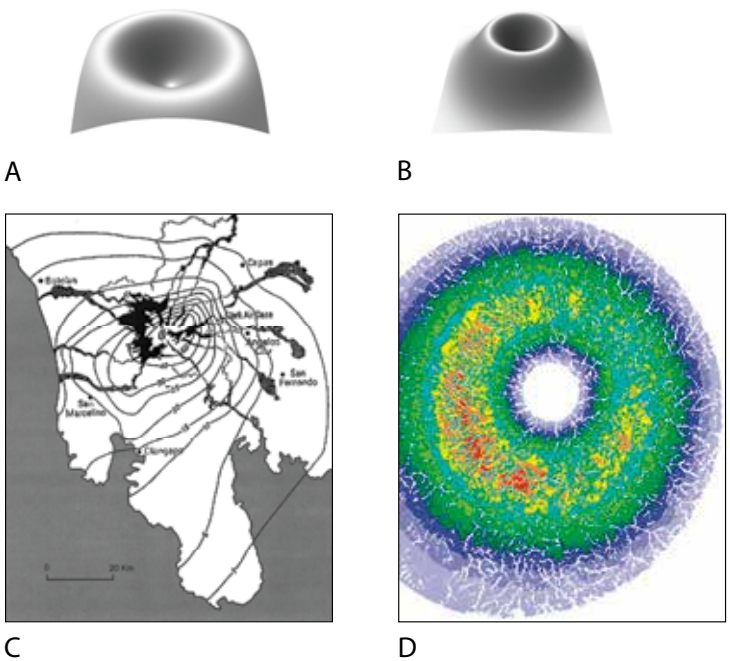


Figura 27. Depósitos provenientes de la explosión del Pinatubo. A. Distribución gaussiana de las partículas finas. B. Distribución gausiana de las partículas gruesas. C. Mapa de terreno de los depósitos. D. Simulación de la distribución de las partículas.

Evolución morfológica de un lago

Utilizando un MDT se puede reconstituir el fondo de un lago (programa Lake_bottom, Parrot, 2004b; Figura 28). El proceso consiste en hacer una esqueletización de la zona plana correspondiente a la superficie del lago en estudio, tomando en cuenta los ríos que lo alimentan y el río de salida. Se busca desde el punto de salida el camino más largo hasta los ríos que alimentan al lago y se aplica una interpolación altimétrica (utilizando la altitud de cada punto del camino y la altitud del límite de la superficie del lago) para definir la morfología del fondo (Figura 29).

Tomando en cuenta los resultados del cálculo del volumen anual de sedimentos que produce la cuenca de alimentación, se hizo una estimación del tiempo necesario para llenar el lago, de tal manera que es posible calcular la tasa de erosión en la zona en estudio.

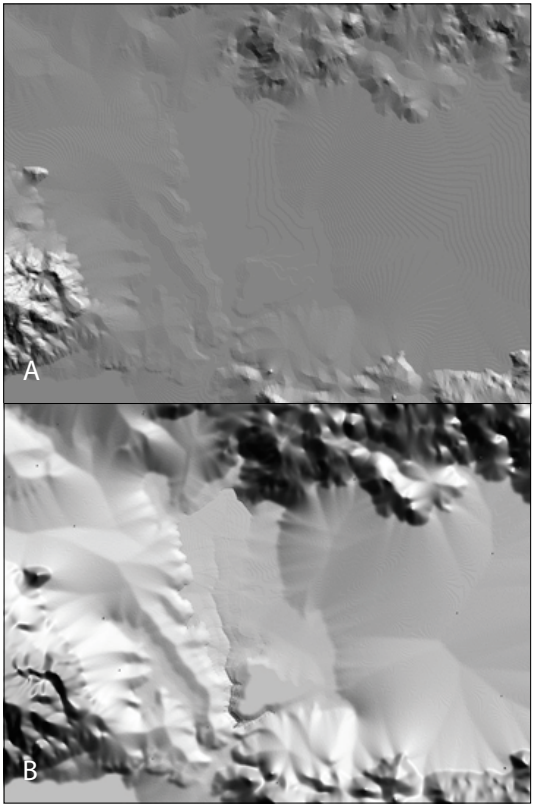


Figura 28. Estimación de la profundidad de un lago (Calixto, 2005; Calixto y Parrot, 2007). A. MDT original. B. fondo reconstituido del lago.

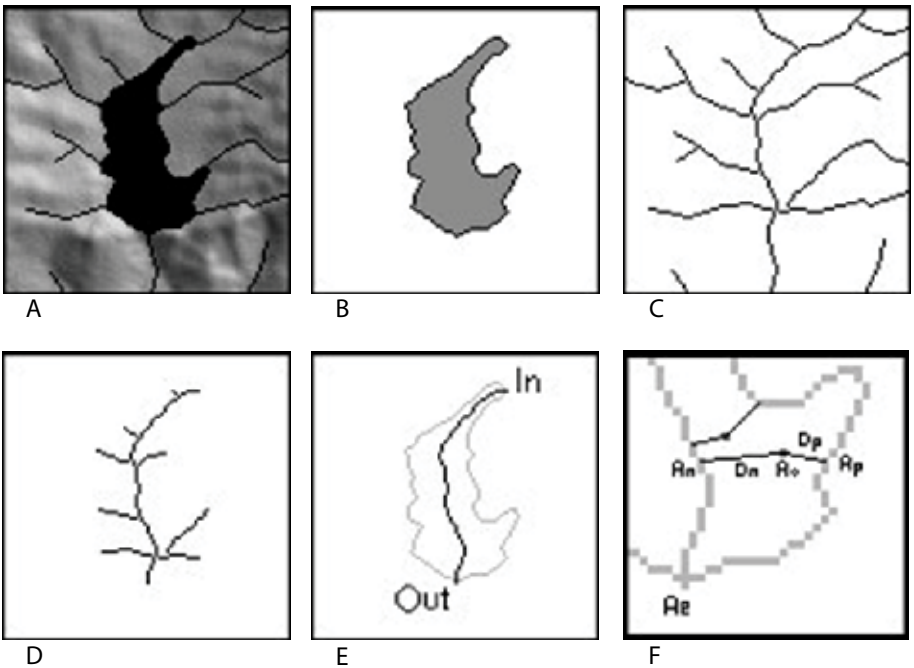


Figura 29. Reconstitución del fondo de un lago. A. red fluvial y superficie de agua libre sobrepuestas sobre el MDT sombreado. B. extracción de la superficie del lago y de su perímetro. C. esqueletización de la red fluvial y de la superficie del lago (O'Gorman, 1990). D. red de drenaje dentro del lago. E. búsqueda del camino más largo entre el punto de salida y las entradas de los afluentes. F. interpolación de la latitud del fondo del lago.

Referencias

Abrahams, A. D. (1984), "Channels networks: a geomorphological perspective", *Water Resources Research*, 20(2), pp. 161-168.

Adiyaman, O., J.-F. Parrot, J. Chorowicz, F. Baudemont and Q. Kose (2003), "Structural interpretation of East Anatolian volcanic edifices provided by a numerical analysis of Digital Elevation Model", *Zeitchrift für Geomorph*. 47(2), pp. 235-250.

Akl, S. G. and G. Toussaint (1978), "Efficient convex hull algorithms for pattern recognition applications", *Proc*. 4th Int. Joint *Conf. on Pattern Recognition, Kyoto, Japan*, pp. 483-487.

Akl, S. G. (1979), "Two remarks on a convex hull algorithm", *Information Processing Letters*, no. 8, pp. 108-110.

Anderson, A. N., A. B. McBratney and E. A. FitzPatrick (1996), "Soil mass, surface and spectral fractal dimensions estimated from thin section photographs", *Soil Science Society of American Journal*, no. 60, pp. 962-969.

Anderson, A. N., J. W. Crawford and A. B. McBratney (2000), "On diffusion in fractal soil structures", *Soil Science Society of American Journal*, no. 64, pp. 19-24.

Bak, P. R. and A. J. Mill (1989), "Three dimensional representation in a Geoscientific Resource Management System for the minerals industry", in Raper, J. (ed.), *Three-Dimensional Applications in Geographic Information Systems*, Taylor & Francis, London, pp. 155-182.

Band, L. E. (1986), "Topographic partition of watersheds with Digital Elevation Models", *Water Resources Research*, 22(1), pp. 15-24.

Baudemont, F. and J.-F. Parrot (2000), "Structural analysis of DEMs by intersection of surface's normal in a 3D accumulator space", *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, 38(2), pp. 1191-1198.

Besl, P. J. and R. C. Jain (1986), "Invariant surface characteristics for 3-D object recognition in range images", *Computer Vision Graphics Image Processing*, no. 33, pp. 33-80.

Borrough, P. A., P. F. M. Van Gaans and R. A. Macmillan (2000), "High-resolution landform classification using fuzzy k-means", *Journal to Fuzzy Sets and Systems*, no.113, pp. 37-52.

Calixto-Albarran, I. (2005), *Influencia antrópica en la distribución de especies de peces nativos de la subcuenca del río Teuchitlan, Jalisco*, tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Calixto-Albarrán, I. and J.-F. Parrot (2007), "Automated lake evolution assessment by using DEM and satellite data. A key to understand species declination in the La Vega pool (Mexico)", *Geomática*, Barcelona (febrero 2007).

Chen, C. C., J. S. Daponte and M. D. Fox (1989), "Fractal feature analysis and classification in medical imaging", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 8(2), pp. 133-142.

Cheng, Y. C., P. J. Lee and T. Y. Lee (1999), "Self-similarity dimensions of the Taiwan Island landscape", *Computers and Geosciences*, 25, 9, pp. 1043-1050.

Chorowicz, J., C. Ichoku, S. Raizanoff, Y. Kim and B. Cervelle (1992), "A combined algorithm for automated drainage network extraction", *Water Resources Research*, 28(5), pp. 1293-1302.

Chorowicz, J., E. López, J.-F. Parrot, J.-P. Rudant, R. Viluan and F. Garcia (1997), "Keys to analyze active lahars from Pinatubo on SAR ERS Imagery", *Remote Sensing of Environment*, no. 62, pp. 20-29.

Chorowicz, J., J.-F. Parrot, H. Taud, M. Hakdaoui, J. P. Rudant and T. Ruiz (1995), "Automatic pattern recognition of geomorphic features from DEMs and satellite images", *Zeitschrift Fur Geomorphologie N.F.*, suppl.-Bd, no. 101, pp. 69-84.

Clarke, K. C. (1986), "Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method", *Computers and Geosciences*, 12, 5, pp. 713-722.

Cocquerez, J.-P. and S. Philipp (1995), *Analyse d'images: filtrage et segmentation*, Ed. Masson.

Coster, M. et J. L. Chermant (1989), *Précis d'analyse d'images,* Presses du CNRS.

Datcu, M., D. Luca and K. Seidel (1996), "Wavelet-based digital elevation model analysis", *16th EARSeL Symposium 1996,* Rotterdam, Brookfield, pp. 283-290.

Deimel, L. E., D. F. Mcallister and C. L. Doss (1982), "Techniques for computerized lake and river fills in Digital Terrain Models", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(9), pp. 1431-1436.

Dikau, R. (1989), "The application of a digital terrain model to landform analysis in geomorphology", in Raper, J. (ed.), *Three-Dimensional Applications in Geographic Information Systems*, Taylor & Francis, London, pp. 51-78.

Dymond J. R., R. C. Derose and G. R. Harmsworth (1995), "Automated mapping of land components from digital elevation data", *Earth Surface Processes and Landforms*, no. 20, pp. 131-137.

Feder, J. (1988), *Fractals*, New York, Plenum.

Fisher, R. (1953), "Dispersion on a sphere", *Proc Roy Soc London*, A(217), pp. 295-305.

Florinsky, I. V. (1998), "Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models", *International Journal of Geographical Information Science*, no. 12, pp. 47-62.

Gallant, J. C. and J. P. Wilson (2000), "Primary topographic attributes", in Wilson, J. P. and J. C. Gallant (eds.), *Terrain Analysis. Principles and Applications*, John Willey & Sons, New York, pp. 51-85.

García-Zúñiga, F. et J.-F. Parrot (1998), "Analyse tomomorphométrique d'un edifice volcanique récent: Misti (Perou)", *CR Acad. Sci.*, no. 327, pp. 457-462.

Giles, P. T. (1998), "Geomorphological signatures: classification of aggregated slope unit objects from digital elevation and remote sensing data", *Earth Surface Processes and Landforms*, no. 20, pp. 581-594.

Hadipriono, F. C., J. G. Lyon, T. Li and D. P. Argialas (1990), "The development of a knowledge-based expert system for analysis of drainage patterns", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(6), pp. 905-909.

Haralick, K. F. (1983), "Ridges and valleys on digital images", *Computer Vision Graphics Image Processing*, no. 22, pp. 28-38.

Harris, R. and E. C. Barrett (1978), "Toward an objective nephanalysis", *J. Appl. Meteorology*, no. 17, pp. 1258-1266.

Ichoku, C., J. Chorowicz and J.-F. Parrot (1994), "Computerized construction of geological cross-sections from digital maps", *Computers and Geoscience*, 20(9), pp. 1321-1327.

Jarvis, R. A. (1973), "On the identification of the convex hull of a finite set of points in the plane", *Info. Proc. Letters.*, no. 2, pp. 18-21.

Jenson, S. K. (1991), "Applications of hydrologic information automatically extracted from Digital Elevation Models", *Hydrological Processes*, no. 5, pp. 31-44.

Jenson, S. K. and J. O. Domingue (1988), "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), pp. 1593–1600.

Klinkenberg, B. and M. F. Goodchild (1992), "The fractal proprieties of topography: a comparison of methods", *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 3, pp. 217-234.

Kraak, M. J. (1989), Computer-assisted cartographical 3D imaging techniques", in *Three-Dimensional Applications in Geographic Information Systems*, Ed. J. Raper, Taylor and Francis, London, pp. 99-114.

Lugo H., J. (1988), *Elementos de geomorfología aplicada*, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Mandelbrot, B. (1983), *The fractal geometry of nature*, Freeman, San Francisco, USA.

Martz, L. W. and J. Garbrecht (1992), "Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from Digital Elevation Models", *Computer and Geosciences*, 18(6), pp. 747-761.

Matsuyama, T., S. Miura and M. Nagao (1983), "Structural analysis of natural textures by Fourier transformation", *Computer Vision Graphics Image Processing*, no. 24, pp. 347-362.

Mc Laren, R. A. and T. J. Kennie (1989), "Visualisation of digital terrain model: techniques and applications", in Raper, J. (ed.), *Three-Dimensional Applications in Geographic Information Systems*, Taylor and Francis, London, pp. 79-98.

Meiseils, A., S. Raizman and A. Karnieli (1995), "Skeletonizing a DEM into a drainage network", *Computer and Geosciences*, 21(1), pp. 187-196.

Mitasova, H., J. Hofierka, M. Zlocha and L. R. Iverson (1996), "Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS", *International of Geographical Information Systems*, no. 10, pp. 611-618.

Mitasova, H. and J. Hofierka (1993), "Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis", *Mathematical Geology*, no. l25, pp. 657-669.

Moore, I. D., J. C. Gallant, L. Guerra and J. D. Kalma (1993a), "Modeling the spatial variability of hydrological processes using GIS", in Kovar, K. and H. P. Nachtnebel (eds.), *International Association of Hydrological Sciences Publication*, no. 211, pp. 83-92.

Moore, I. D., A. Lewis and J. C. Gallant (1993b), "Terrain attributes: estimation methods and scale effects", in Jakeman, A. J., M. B. Beck and M. J. McAleer (eds.), *Modeling Change in Environmental Systems*, New York; Willey, pp. 189-214.

Moore, I. D. (1992), "Terrain analysis programs for the environmental sciences", *Agricultural Systems and Information Technology*, no. 2, pp. 37-39.

Motet, S. (1992), *Traitements géométriques*, Cours de DEA IGN-ENSG.

Noyola, C., C. Mering, J.-F. Parrot, B. Collet, L. Vásquez-Selem and V. Ochoa-Tejeda (2003), "Geomorphologic features of the Chichinautzin (Mexico) cinder cones by means of a 3D morphological approach", *Regional Geomorphology Conference Geomorphic hazards: towards the prevention of disasters Mexico*, oct-nov.

Noyola, C., J.-F. Parrot, C. Mering et M. Fort (2004), "Caractéristiques géomorphologiques des cônes de cendre de la Sierra Chichinautzin (Mexique) au moyen de la tomomorphométrie et de la télédétection", *30th Internacional Congress of Geography,* Glasgow.

O'Gorman, L. (1990), "k × k Thinning", *CVGIP*, no. 51, pp. 195-215.

Ochoa-Tejeda, V. (2004), *Propuesta metodológica para el estudio de inestabilidad de laderas a partir de los MDT y la Percepción Remota. Sierra Norte de Puebla*, tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Ochoa-Tejeda, V., J.-F. Parrot y J. Lugo (2002) "Influencia de la pendiente en la medida de la longitud de las redes fluviales", *III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra* (Puerto Vallarta), 4-8 de noviembre, *GEOS*, Bol. Inform, Ep. II, 22(2), pp. 230-231.

Park, R. T., D. G. Tarboton and C. N. Goodwin (2001), "SINMAP: a stability index approach to terrain stability hazard mapping", *Canadian Forest Product*.

Parker, J. R. (1994), *Practical computer vision using C*, Wiley & Sons, New York.

Parrot, J.-F. (2002), *Program Rio4* (software inédito).

Parrot, J.-F. (2003), *Program Disec* (software inédito).

Parrot, J.-F. (2004a), *Program Elo-Sim* (software inédito).

Parrot, J.-F. (2004b), *Programs Lake_bottom, Materos and Lake_filing* (software inédito).

Parrot, J.-F. (2006), *TLALOC Software (Tridimensional Landscape Analysis. Local Operating Computation)*, UNAM, México.

Parrot, J.-F. (2007), "Tri-dimensional parameterisation: an automated treatment to study the evolution of volcanic cones", *Géomorphologie,* no. 3, pp. 37-47.

Parrot J.-F., N. Lyberis, B. Lefauconnier and G. Manby (1993), "SPOT multispectral data and digital terrain model for the analysis of ice-snow fields on arctic glaciers", *International Journal of Remote Sensing*, 14(3), pp. 425-440.

Parrot, J.-F. y V. Ochoa-Tejeda (2002), "Relación densidad/dimensión fractal de la red de drenaje: parámetro geomorfológico de erosión", *III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra,* (Puerto Vallarta), 4-8 de noviembre, *GEOS,* Bol: Inform., Esp. II, 22(2), p. 229.

Parrot, J.-F., H. Taud and V. Ochoa-Tejeda (2005), "DEM surface roughness measured according to local contour line length. Application to the morphometric study of

the Sierra Norte de Puebla (Mexico)", *6th International Conference on Geomorphology*, Zaragoza, September.

Parrot, J.-F., V. Ochoa-Tejeda and J. Lugo (2008), "3-dimensional drainage analysis. A key for geomorphology studies", *Zeitchrift für Geomorphologie*, 52(2), Stuttgart, Berlin, pp. 237-255.

Peet, F.G. and T. S. Sahota (1985), "Surface curvature as a measure of image textura", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(6), pp. 734-738.

Pentland, A. (1984), "Fractal-based description of natural scenes", *IEEE Transactions on pattern analysis machine intelligence*, no. 6, pp. 661-674.

Philipp, S. and M. Smadja (1994), "Approximation of granular textures by quadratic surfaces", *Pattern recognition*, 27(8), pp. 1051-1063.

Pike, R. J. (2002), "A bibliography of terrain modeling (Geomorphometry). The Quantitative Representation of Topography", *U.S. Geological survey Open-file report*, 02-465.

Plastock R. A. and G. Kalley (1987), *Infographie*, McGraw Hill.

Polidori, L. (1991), "Validation de modèles numériques de terrain application à la cartographie des risques géologiques", *Thèse en Méthodes Physiques en Télédétection*, Université de Paris 7.

Polidori, L., J. Chorowicz and R. Guillande (1991), "Description of terrain as a fractal surface, and application to Digital Elevation Model quality assessment", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, 10, pp. 1329-1332.

Pratt, W. K. (1978), *Digital image processing*, Wiley & Sons, New York.

Raper, J. F. (1989), "The 3-dimensional geoscientific mapping and modeling system: a conceptual design", in Raper, J. (ed.), *Three-Dimensional Applications in Geographic Information Systems*, Taylor & Francis, London, pp. 11-20.

Rogers, D. (1988), *Algorithmes pour l'infographie*, McGraw Hill.

Running, S. W. and P. E. Thornton (1996), "Generating daily surfaces of temperature and precipitation over complex topography", in Goodchild, M. F., L. T. Steyaert, B. O. Parks, C. Johnston, D. R. Maidment, M. Crane and S. Glendinning (eds), *GIS and environmental modeling, Progress and Research Issues*, Fort Collins, CO, GIS World Books, pp. 93-8.

Saint-Marc, P. et M. Richetin (1987), "Filtrage structurel d'images grises par analyse des courbures principales des surfaces associées", *Traitement du signal*, 4(5), pp. 411-427.

Sánchez-Titla, E. (2005), *Vulnerabilidad, deforestación y inestabilidad de laderas: una zonificación del riesgo en Zacatlán, Puebla*, tesis de Maestría, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Sarkar, N. and B. B. Chaudhuri (1994), "An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 24, 1, pp. 115-120.

Schetselaar, E. M. (1995), "Computerized field-data capture and GIS analysis for generation of cross sections in 3-D perspective views", *Computer and Geosciences*, 21(5), pp. 687-701.

Schweizer, P. (1987), *Infographie*, vol. I and II, Ed Presses Polytechniques romandes.

Seemuller, W. W. (1989), "The extraction of ordered vector drainage networks from elevation data", *Computer Vision Graphics Image Processing*, no. 47, pp. 45-58.

Smith, T. R, C. Zhan and P. Gao (1990), "A knowledge-based, two-step procedure for extracting channel networks from noisy DEM data", *Computer and Geosciences*, 16(6), pp. 777-786.

Strahler, A. N. (1952), "Dynamic basis of geomorphology", *Bull. Geol. Soc. Amer.*, no. 63, pp. 923-938.

Tarboton, D. G, R. L. Bras and I. Rodríguez-Iturbe (1991), "On the extraction of channel networks from digital elevation data", *Hydrological Processes*, no. 5, pp. 81-100.

Taud, H. and J.-F. Parrot (2005), "DEM roughness measurement by local fractal dimension", *Géomorphologie,* no. 4, pp. 327-338.

Tribe, A. (1991), "Automated recognition of valley heads from Digital Elevation Models", *Earth surface and landforms*, no. 16, pp. 33-49.

Van Driel, J. N. (1989), "Three dimensional display of geologic data", in Raper, J. (ed.), *Three-Dimensional Applications in Geographic Information Systems*, Taylor & Francis, London, pp. 1-10.

Voiron, C. (1995), *Analyse spatiale et analyse d'images*, Reclus.

Wilson, J. P. and J. C. Gallant (2000), *Terrain Analysis. Principles and Applications*, John Willey & Sons, New York.

Woo, M., J. Neider and T. Davis (1997), *OpenGL programming Guide*, 2nd edition, Addison Wesley Developers Press.

Wood, J. (1996), *The geomorphological characterisation of Digital Elevation Model. Master of Sciences*, Leicester University (UK).

Xie, H. and J.-A. Wang (1999), "Direct fractal measurement of fracture surfaces", *International Journal of Solids and Structures*, 36(20), pp. 3073-3084

Yuan, L. P. and N. L. Vanderpool (1986), "Drainage network simulation", *Computer and Geosciences*, 12(5), pp. 653-665.

Capítulo 11. Técnicas de análisis SIG como instrumento de toma de descisiones: diseño del plan maestro del Camino de la Virgen de Talpa

Ruth Miranda Guerrero
Jesús Rodríguez Rodríguez
Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio
Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades, Universidad de Guadalajara

María Isabel Ramírez Ramírez
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental
Universidad Nacional Autónoma de México

Néstor Corona Morales
Posgrado en Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

La toma de decisiones de interés público debe de estar guiada por al menos uno de los siguientes aspectos: mayor eficiencia, equidad, viabilidad para la comunidad o salud ambiental. Estas tareas, que regularmente recaen en los gobiernos u otras instituciones locales, requieren ser tomadas con el respaldo de información adecuada y de fácil comunicación para una ciudadanía cada vez más demandante e involucrada. Por ello, el uso de tecnologías de la información geográfica, en concretó de SIG, se ha convertido en una herramienta de notables beneficios para la toma de mejores decisiones, sobre todo en tres áreas principales: *a)* provisión de servicios, *b)* gobernabilidad y política pública, y *c)* información pública y participación comunitaria (O'Looney, 2000; Anderson, 2005). El trabajo que aquí se presenta atiende principalmente al primer punto, aunque se consideran también aspectos de los otros dos.

El objetivo de este trabajo ha sido establecer un plan de intervención de equipamientos básicos que haga más fácil, atractivo y seguro el peregrinaje

del Camino de la Virgen del Rosario de Talpa (CVRT). Lo anterior a través de la generación de un modelo territorial SIG, que a su vez servirá para evaluar los resultados de la aplicación de las propuestas, una vez que éstas sean implementadas por parte de los gobiernos e instituciones locales. Es decir, se pretende cubrir los primeros pasos considerados en la generación de políticas públicas, que según Anderson (2005) son: *a)* entender una problemática dada, *b)* evaluar opciones de solución y *c)* seleccionar las acciones más convenientes. Así como sentar las bases para completar el ciclo referente a dicha generación de política pública: *d)* implementar las acciones, y *e)* evaluar las consecuencias de su aplicación, para hacer los ajustes correspondientes.

El CVRT presenta dos momentos diferenciados, el de la romería de Semana Santa, donde un elevado número de peregrinos dejan una considerable derrama económica en los municipios por donde pasan; y, el del resto del año, en que se reciben peregrinaciones pequeñas o individuales provenientes de diferentes puntos del mundo rural jalisciense. A diferencia de otras rutas que conducen a santuarios religiosos, el CVRT mantiene aún su sentido religioso-cultural de origen. Por ello, los peregrinos aceptan las dificultades que implica el camino, pero reconocen que sería deseable un mayor equipamiento con infraestructura y servicios básicos, como albergues, señalizaciones, fuentes de agua, depósitos de basura y vigilancia, entre otros. De tal forma, las autoridades locales, en coordinación con la Secretaría de Desarrollo Urbano (SEDEUR) del Gobierno de Jalisco, han considerado oportuno elaborar el Plan Maestro del CVRT (PM-CVRT).

Según lo referido, el CVRT se clasificaría como una ruta religiosa-cultural, de forma lineal y de carácter local (Sugio, 2005). Este tipo de rutas culturales se caracteriza por ser geográficamente más amplias que el propio derrotero que las identifica, poseer una vasta diversidad natural y tener una fuerte asociación a elementos intangibles. Esto supone retos especiales en la identificación y análisis de la propia ruta, así como con el proceso relacionado de toma de decisiones. Por lo tanto, cualquier método que estudie la ruta debería ser estandarizado o de fácil adopción por las diferentes instituciones o agencias involucradas. Esto facilitaría la comparación consistente y el análisis de diferentes secciones del camino y su integración en una ruta continua (Wataru, 2005).

Por lo anterior, para la creación del modelo territorial cartográfico que sirviera para el análisis y negociación del PM-CVRT, se recurrió a la aplicación de tecnología SIG, ya que está ampliamente probada para la recopilación, análisis, modelado y presentación de datos espaciales. A través de una plataforma SIG es posible manejar grandes volúmenes de datos, intercambiar información, analizar y ofrecer resultados en diferentes soportes (analógicos y digitales) a un mayor

número de interesados (SIG Web; Burrough, 1986; Bosque, 1992; Ordónez y Martínez, 2003).

La integración de herramientas SIG, incluyendo datos GPS (*Global Positioning System*) y cartografía, da por resultado una serie cartográfica construida conforme a tres niveles de interpretación espacial y expresión gráfica. En primer lugar están los mapas analíticos que representan la caracterización geográfica del CVRT y su contexto regional. En segundo lugar están los mapas sintéticos, en los que se asocian dos o más variables relacionadas para ofrecer un nuevo planteamiento sobre la caracterización territorial. Y, en el tercer nivel, los modelos territoriales SIG, que surgen de un proceso de síntesis que permite identificar las tendencias y potencialidades geográficas (Sancho, 2001). El resultado es una serie de mapas analíticos y sintéticos que resumen el máximo de abstracción de la realidad geográfica.

El Camino de la Virgen del Rosario de Talpa

Paralelo al trabajo que aquí se presenta, con el apoyo de la Secretaría de Cultura del Gobierno del Estado de Jalisco, se llevó a cabo una guía del CVRT (Miranda *et al.*, 2006). En ésta se reunió la información histórica y ambiental, documental y obtenida en campo, considerada para el diseño del Plan Maestro. De la información allí contenida se pueden destacar los siguientes aspectos.

El escenario objeto de estudio

El tradicional Camino de la Virgen del Rosario de Talpa (CVRT) avanza por los municipios de Ameca, Guachinango, Mixtlán, Atenguillo, Mascota y Talpa de Allende, todos de Jalisco. Tiene diferentes ramificaciones que se extienden a otros municipios del centro y sur de Jalisco, mismos que se prolongan por los estados vecinos de Nayarit (ruta de Mascota), Colima (ruta de Tuxpan) y Michoacán (ruta San José de Gracia) y algunas conectan con la capital (ruta Guadalajara). Esta ruta religiosa-cultural de 92 km, nace en la cabecera municipal de Ameca (20°33'N; 103°03'W; 1 250 msnm), a 82 km de la ciudad de Guadalajara, en dirección noroeste hasta llegar al santuario de la Virgen, en Talpa de Allende (20°23'N; 104°49'W; 1 160 msnm; Figuras 1 y 2).

La mayoría de los peregrinos parten del poblado de Lagunillas (en Ameca), sitio que representa el primer reto del CVRT: el ascenso al cerro del Obispo. Durante el ascenso, en dirección oriente, se observa el conjunto de lomas que dan paso al llano del río Ameca, escurrimiento principal y agente modelador de estos

paisajes. Ya en la cima del Cerro del Obispo (más de 1 900 m) se contempla parte de las serranías norteñas de Ameca (Figuras 1 y 2).

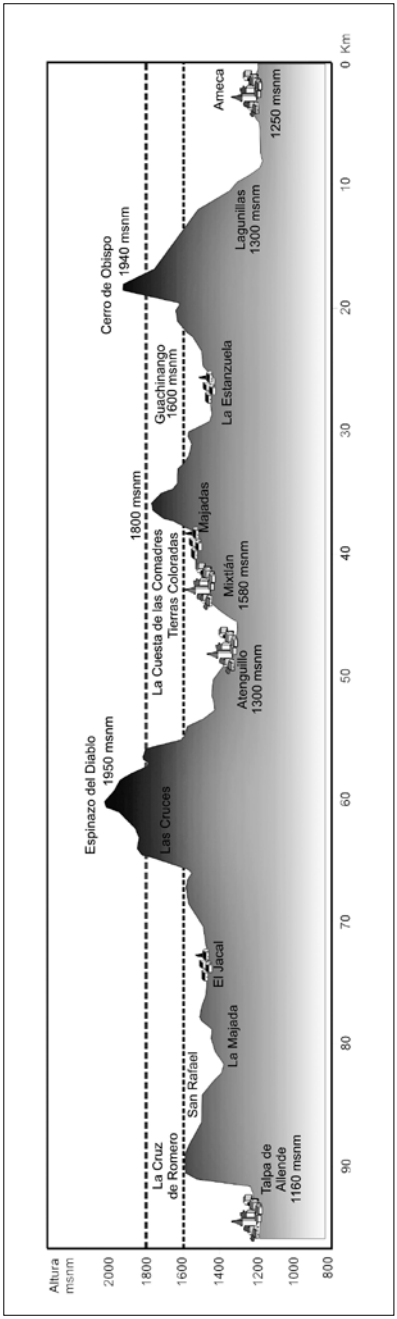
El siguiente sitio del CVRT es la ranchería La Estanzuela, ubicada cerca del crucero que conduce al poblado de Guachinango. Pasando este punto, el CVRT implica el ascenso de dos escalones altitudinales, el primero a 1 600 m y el segundo a los 1 800 m. Desde aquí domina la panorámica sur del conjunto montañoso volcánico que se une a la Sierra Verde. Al librar la Cuesta de las Comadres (1 800 m) el CVRT desciende al valle de Mixtlán (1 580 de altitud). En el descenso se presenta una terraza superior identificada como Tierras Coloradas, cuyos suelos rojos son referentes del topónimo del lugar (Figuras 1 y 2).

Después se pasa por Majadas, punto en el que los peregrinos suelen acampar. Las enramadas (estructuras de troncos de encino y techo de ramas y hojas del mismo árbol) que se instalan, son el refugio de los caminantes que pasarán la primera noche de su peregrinaje. Después de Majadas la etapa siguiente es Santa Rita (a 9 km), cuyo paisaje corresponde a la región de las sierras volcánicas y valles interiores que se formaron al fracturarse el Bloque Jalisco.

Al dejar el municipio de Mixtlán, la ruta sigue descendiendo hasta alcanzar Atenguillo (1 300 msnm). El CVRT implica cruzar el río Atenguillo, por lo que esta etapa se hace durante la época de estiaje. El margen del río es un punto de descanso de cara al ascenso del cerro Sacrificio, para luego continuar hasta el puerto más alto del CVRT, conocido como el Espinazo del Diablo (1 950 msnm). Desde esta cumbre se visualiza que es una ramificación del conjunto montañoso volcánico terciario conocido como Sierra de Cacoma o Arrastradero.

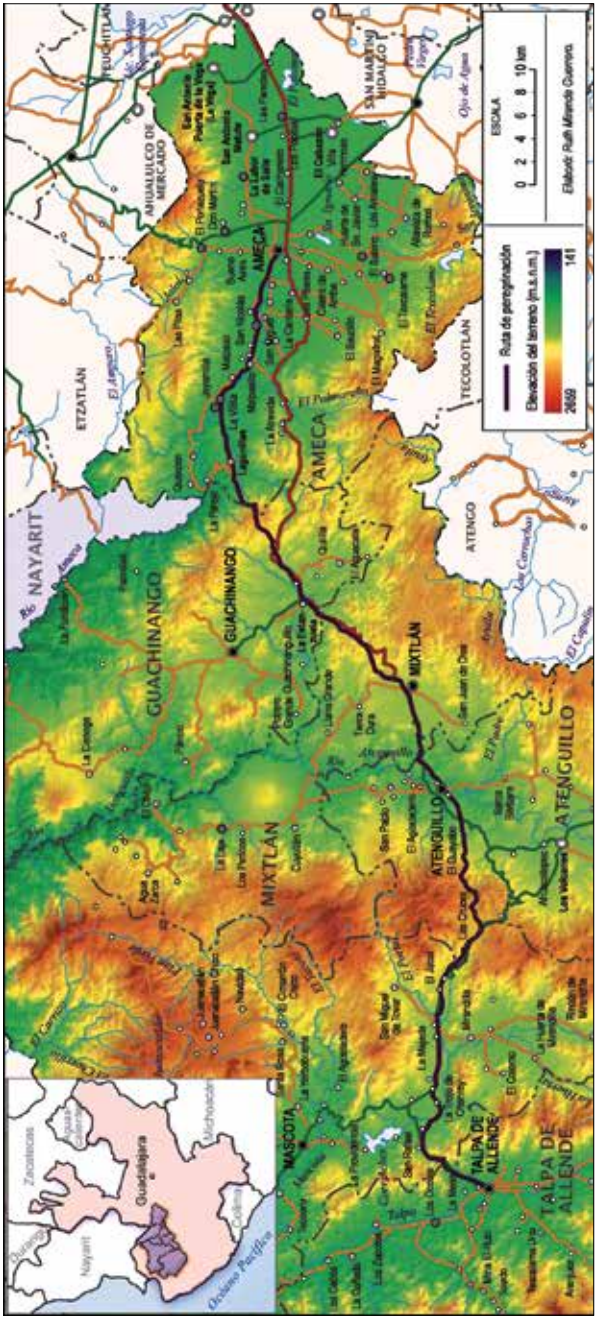
Los sitios siguientes del CVRT son: Sol de Oro, Jacales, Malpaso, Gallineros, San Rafael (La Roblada) y Cocinas de Mascota (20 kilómetros aproximadamente de recorrido). En las Cruces o en San Rafael los peregrinos suelen pasar la segunda noche. Y el último reto del CVRT es la cuesta que conduce a La Cruz de Romero (poco más de 1 600 msnm) desde donde se observa, en dirección suroeste, el valle y pueblo de Talpa de Allende y en el horizonte la Sierra de Cacoma (Figuras 1 y 2).

Cabe decir que los escenarios del CVRT son revestidos por vegetación que varía según el piso altitudinal y sus particulares orográficas. Se presentan cubiertas que en su mayoría se componen de oyameles, pinos, robles y encinos en las partes más altas; y matorrales espinosos, como mezquites, palo dulce, guamúchiles, además de eucaliptos y tepehuajes en las partes medias y bajas. La temperatura media anual va de los 19.8 a los 21.3° C, con una precipitación promedio anual entre los 864 hasta los 1 039 mm, con régimen de lluvias de junio a septiembre.



Fuente: elaboración propia a partir del levantamiento GPS.

Figura 1. Perfil del Camino de la Virgen del Rosario de Talpa (CVRT).



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Mapa general del Camino de la Virgen del Rosario de Talpa (CVRT).

Las actividades principales de la región son las propias del ámbito rural jalisciense: la agricultura (maíz, frijol, garbanzo, café, hortalizas y frutales) y la ganadería. Y, como remanente del pasado colonial, la minería, que en este caso se practica en pequeña escala (Guachinango y Talpa de Allende). Otras actividades son la elaboración de conservas, rollo de guayaba y rompope; y, en el caso de Talpa de Allende, la fabricación de toda clase de figuras artesanales hechas con una resina natural obtenida del árbol del chilte. Estas actividades se conjugan con el "turismo" religioso, aprovechando la derrama económica que generan los peregrinos que acuden cada año al Santuario de la Virgen del Rosario de Talpa. Si bien hay un flujo constante de peregrinos, la romería del CVRT se presenta durante las festividades de Semana Santa; y, en menor medida, en otras cuatro fechas asociadas a la historia y ritualidad de la Virgen.

Los peregrinos del CVRT

El peregrino de CVRT no pertenece a un grupo social determinado. Participan tanto hombres como mujeres de todos los grupos de edad (niños, jóvenes, adultos y ancianos), aunque hay predominancia de varones jóvenes. Por lo general, los peregrinos se organizan en grupos compactos numerosos que conviven y enfrentan los retos del Camino. Rentan autobuses o utilizan otros medios de transporte, desde los cuales reciben también apoyo: alimentación, traslados, servicios médicos. Durante la peregrinación, los grupos se diferencian según edad y género y por el ritmo que le imprimen al paso. Así, los más jóvenes se aventuran a seguir los atajos del CVRT y la mayor parte del camino lo hacen alejados de la carretera, su meta es llegar al Santuario en dos días y medio. En cambio los mayores, mujeres y niños, hacen el camino al margen de la carretera, esto les supone concluir el CVRT en tres o tres días y medio.

La tradición de la Virgen del Rosario de Talpa

La Virgen del Rosario de Talpa es una de las "tres hermanas" a las que el pueblo de Jalisco tiene especial veneración. Las otras dos son la Virgen de la Expectación de Zapopan y la Virgen de Nuestra Señora de San Juan de los Lagos. Las tres son pequeñas esculturas talladas en madera, con notables semejanzas entre sí que hacen suponer un origen común, probablemente elaboradas en la región purépecha de Michoacán.

En trabajos sobre la historia de la región se menciona que la semilla mariana fue sembrada por los conquistadores en una tierra que veneraba a numerosas deidades femeninas. Es de suponer que el santuario de la Virgen de Talpa corresponde con un adoratorio de alguna divinidad prehispánica, ya que se sugiere que

Talpa pudo haber sido un antiguo centro ceremonial, adoratorio de Civacoatl, la diosa de la Tierra. Asimismo, entre los huicholes hay una serie de deidades femeninas llamadas *Tate'* (nuestra madre), las cuales tienen sus adoratorios en las lagunas de Talpa y Mascota.

Estos argumentos conducen al momento de la evangelización, cuya primera etapa inició entre 1550 y 1551, cuando los frailes franciscanos propagaron el culto mariano en torno de la Purísima Concepción.

Metodología

A partir de un planteamiento analítico-sintético se diseñó el mapa conceptual sobre el que se estructuró el guión metodológico de la investigación, el cual se resume en las etapas que se muestran en la Figura 3.

Primera etapa: comprende la revisión y acopio documental de las fuentes primarias para elaborar el marco de referencia religioso-cultural del peregrinaje a la Virgen del Rosario de Talpa. Asimismo, la recopilación de la información analítica para alimentar al SIG, incluyendo la homologación de datos que no cumplían con los requerimientos técnicos para introducirlos directamente al sistema, la digitalización y la georreferenciación de otros. Se utilizaron datos vectoriales (escala 1:50 000), cartografía temática (1:50 000 y 1:250 000) y ortofotos digitales (1:20 000) del INEGI; datos digitales del Instituto de Información Territorial de Jalisco (IIT-JAL), e imágenes de satélite Landsat del 2003. A la par se hizo el levantamiento directo de datos e información, a través de encuestas y entrevistas, con la finalidad de caracterizar al peregrino actual, saber de sus demandas o requerimientos para el CVRT, conocer a los prestadores de servicios, e identificar a los agentes involucrados. Esto último permitió, además, construir la agenda de actores locales del CVRT.

Segunda etapa: corresponde con el diseño y construcción del SIG-CVRT, cuya meta fue cumplir la fase de caracterización del escenario objeto de estudio y la elaboración de capas básicas y analíticas, insumos de los materiales cartográficos sintéticos. Todas ellas asociadas a sus correspondientes catálogos de metadatos. El proyecto del SIG-CVR se desarrolló principalmente con el software ArcView 3.2, aunque para determinadas etapas se requirió del apoyo de otros paquetes, como Erdas Imagine 8.5 para la clasificación de las imágenes satelitales y la elaboración del MDE, ArcGis 9.1 para ciertos procesos de análisis espacial, Excel para estandarizar las tablas de datos y Autocad para la digitalización y conversión de algunas capas de información.

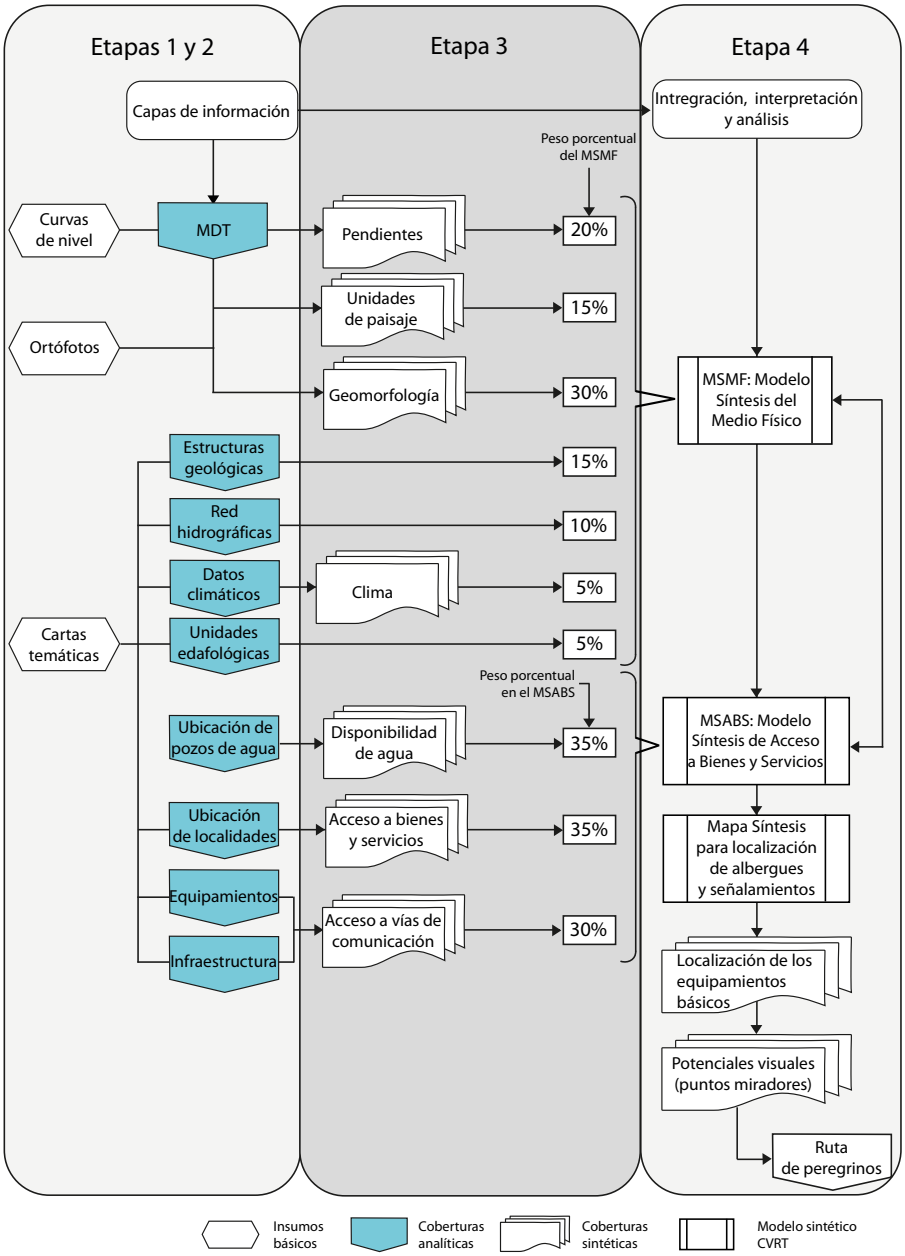


Figura 3. Mapa conceptual del SIG-CVRT.

Respecto a la información digital integrada, una vez hechos los ajustes de datos (en exactitud, jerarquía y definición) se construyó el mapa base; así como los mapas temáticos analíticos y la serie cartográfica sintética.

Tercera etapa: se basó en la incorporación de los datos levantados en campo al SIG-CVRT, para ello se utilizaron dos navegadores GPS *Garmin* y radios con navegador GPS *Garmin Rino* (*walk and talk).* Con estos equipos se registraron los trayectos (*tracks*) y puntos señalados en las opiniones de los encuestados, lo cual permitió identificar en campo los posibles sitios para instalar equipamiento (miradores, áreas de descanso, fuentes de agua, albergues y señalizaciones). Además del levantamiento de la ruta, se verificaron los datos obtenidos por los demás métodos, con el fin de completar las tablas de datos espaciales SIG.

Para los recorridos en campo se organizaron dos cuadrillas, una que hizo el recorrido en vehículo y se encargó de identificar las interacciones del CVRT con la carretera, registrar las coordenadas de cada elemento de interés e inventariar sus condiciones. El segundo equipo siguió a pie el CVRT que recorren los peregrinos. Las características físicas del CVRT que se registraron en campo fueron: ancho del camino, condición del suelo (pedregoso, arenoso, pantanoso, etc.), condiciones de transitabilidad (buena, regular, mala), elementos obstructores de la accesibilidad (escurrimientos, rocas, matorrales, etc.), caracterización general de la cubierta vegetal, composiciones paisajísticas naturales y antropizadas (valor estético alto, medio, bajo), cercanía a los asentamientos poblacionales y características generales de éstos. Otros elementos que se ubicaron con los navegadores GPS fueron las "enramadas" o sitios de descanso; además se aprovechó el recorrido para tomar fotografías digitales y con ello contar con el material gráfico de todo el CVRT.

Una vez completada y validada la información del CVRT, se incorporó al SIG. Con la información cualitativa y cuantitativa que lo integraba se llevó a cabo la construcción de modelos, con lo que se generó nueva información derivada de las capas temáticas originales y de los datos tomados en campo.

Cuarta etapa: en ésta se llevó a cabo la validación de los modelos resultantes de la etapa anterior, a través de entrevistas a profundidad dirigidas a los agentes asociados al CVRT. Este trabajo se organizó en dos talleres participativos, de proyección y de consenso, respectivamente. Se eligió esta técnica con objeto de recoger información y registrar aspectos subjetivos de los participantes sociales ante el fenómeno de la peregrinación (Del Rincón *et al.*, 1995), y con ello acotar los resultados obtenidos a través del modelado SIG. Asimismo, a través de este ejercicio se involucró a diversos agentes con visiones distintas respecto al CVRT (empresarios, gestores, prestadores de servicios). Sus opiniones sirvieron para ma-

tizar los planteamientos derivados directamente del modelo territorial SIG-CVRT, de tal suerte que todos los resultados obtenidos fueron consensuados.

La entrevista a profundidad es una técnica que requiere de un guión de trabajo previamente armado. Por ello, para el primer taller se elaboró un cuadernillo con cinco apartados: religioso, turístico, socioeconómico, gubernamental y ambiental. Éste sirvió como guión de las entrevistas, las cuales fueron del tipo semiabiertas. En la segunda dinámica se expusieron los documentos cartográficos generados y se recopilaron las observaciones obtenidas directamente de los agentes locales.

Para definir la relevancia de los elementos integrados en el SIG-CVRT y mencionados en las dinámicas anteriores, se utilizó una técnica de Proceso Analítico Jerárquico (AHP – *Analytic Hierarchy Process*). Esta técnica permite guiar a los usuarios en la toma de decisiones de problemas complejos, mediante un marco racional que permite otorgar valores cuantitativos a los factores que definen una problemática dada. El AHP facilita la toma de decisiones grupales a través del agregado de opiniones, en donde cada uno de los expertos define su propia jerarquía de prioridades (Saaty, 1997). Para ello se utilizó el software *Expert Choice 2000*, en el que se capturaron todas las variables consideradas por cada categoría, y mediante consenso se les asignó su importancia relativa: 1 = apto, 2 = apto con restricciones y 3 = no apto. A partir de ello se obtuvo el valor ponderado de cada elemento y categoría (Figura 3) mediante la siguiente función:

$$Vx = (Pa/Va)+(Pb/Vb)\ldots + (Pn/Vn) ,$$

donde:

Vx = Valor ponderado del elemento x.
Pa = Peso máximo de la variable a.
Va = Valor otorgado a la variable a (importancia relativa).
Pb = Peso máximo de la variable b.
Vb = Valor otorgado a la variable b.
Pn = Peso máximo de la variable n.
Vn = Valor otorgado a la variable n.
N = Número de elementos considerados.

Procedimientos y resultados

El resultado de la integración SIG, GPS y cartografía fue una serie de mapas organizados según tres modelos sintéticos territoriales: *a)* Modelo Síntesis del Medio Físico (MSMF), *b)* Modelo Síntesis de Accesibilidad a Bienes y Servicios (MSABS), y *c)* Modelo Síntesis para el Diseño del Mapa de Intervenciones para el establecimiento de equipamientos básicos del CVRT (MSDMI-CVRT).

Los modelos territoriales SIG-CVRT

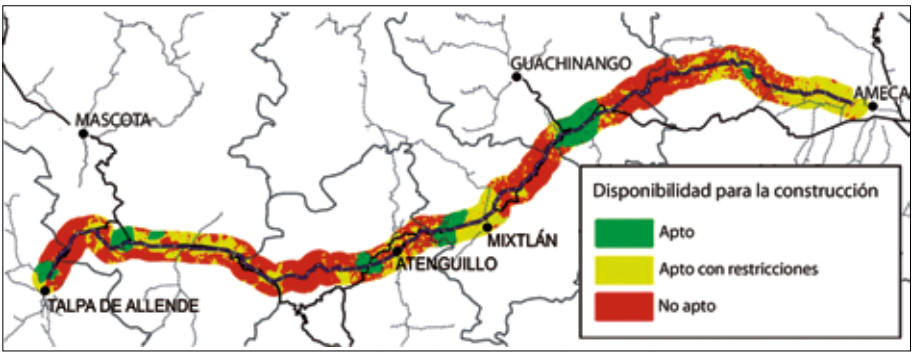
Modelo de síntesis del medio físico (MSMF). Surge de la integración, clasificación, análisis y edición de las variables del medio físico que se identificaron con mayor impacto en el CVRT. El resultado es un modelo cualitativo de tres categorías según áreas: "aptas", "aptas con ciertas restricciones" y "no aptas" para la edificación debido a sus condiciones de carácter físico. A continuación se presentan las capas de información involucradas en el MSMF (Figuras 3 y 4).

Pendientes. Se derivó del MDT y se clasificó con rangos de 0 a 6º (áreas aptas para la construcción); de 6 a 12º (áreas medianamente aptas para la construcción); de 12 a 30º (áreas aptas para la construcción si se hacen adecuaciones en el terreno); y mayores de 30º (áreas no aptas para la construcción). Estos rasgos se relacionan con los efectos de cimentación, tipo de drenaje, suministro de agua, accesibilidad y costos globales de la obra. Para el MSMF esta capa tiene un peso máximo porcentual de 20.

Unidades del Paisaje. Es el resultado de la interpretación del relieve, usos del suelo, cubierta vegetal, las unidades geomorfológicas y las estructuras geológicas. Se puso especial atención en el valor estético de los escenarios paisajísticos, como las cumbres desde las que se tiene una panorámica de conjunto. El valor porcentual de esta capa de información en el MSMF fue de 15.

Estructuras Geológicas y Geomorfológicas. Para la capa geología se digitalizaron las estructuras geológicas de interés: fracturas, fallas, domos, volcanes. Y para la capa geomorfología se identificaron valles erosivos, laderas compuestas, escarpes de falla, barrancas, piedemontes, crestas de lomas, planicies, entre otros de menor representatividad. Cada una de estas unidades presenta diferentes niveles de estabilidad frente al uso de suelo. A cada variable se le asignó un valor relativo proporcional al peso porcentual que en el contexto del MSMF se asignó a estas capas: 15% para las estructuras geológicas y 30% para las unidades geomorfológicas.

Red Hidrográfica. En relación con el MSMF a esta capa de información le correspondió un peso porcentual máximo de 10. Para la clasificación de los cauces y cuerpos de agua se tomaron en cuenta los criterios que establece la Comisión



Fuente: elaboración propia.
Figura 4. Modelo de Síntesis del Medio Físico (MSMF).

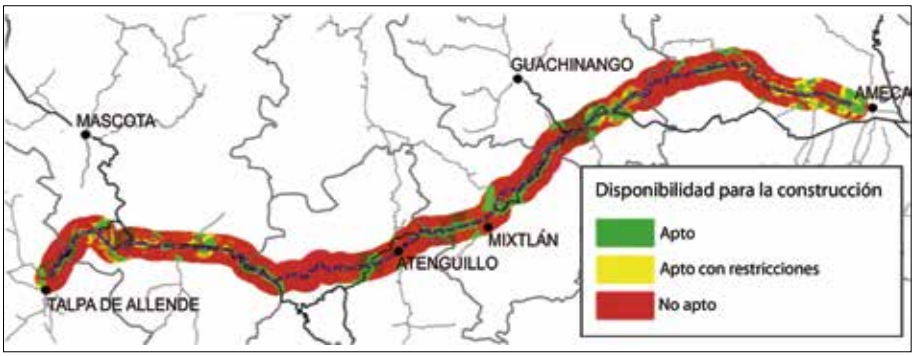
Nacional del Agua (CNA): área de proximidad entre 5 y 15 m para la zona con disponibilidad del recurso hídrico; más otra de 10 a 30 m para la zona de amortiguamiento; y el resto se clasificó como "no cauces, no cuerpos de agua". El resultado fue una capa de información con tres categorías respectivas: áreas "aptas"; "con restricciones" y "no aptas" para la construcción.

Clima. Se identificaron dos tipos de clima: *a)* semicálido subhúmedo, con temperatura media anual mayor a 18° C y *b)* templado subhúmedo, con temperaturas medias anuales entre 12 y 18° C. Como ninguno de éstos presenta condiciones extremas que impidan el recorrido, se asignó a esta capa una participación global del 5% en el MSMF.

Unidades Edafológicas. Las unidades edáficas reconocidas fueron: vertisoles, regosoles, litosoles, andosoles, cambisoles y luvisoles. A esta capa se le asignó un valor de 5% en el MSMF, ya que ningún tipo de suelo representa una limitante definitiva para la construcción.

Modelo de síntesis de accesibilidad a bienes y servicios (MSABS). Surge de la integración, clasificación y análisis de los elementos del sistema de asentamiento humanos y los recursos útiles para el mantenimiento y asistencia a los núcleos flotantes del CVRT. El resultado es un modelo cualitativo en el que se expresan las áreas "aptas", "con ciertas restricciones" y "no aptas" a la edificación o construcción de albergues, miradores, sitios de descanso y fuentes de agua, de acuerdo con su ubicación respecto a una red de bienes y servicios preexistente (Figuras 3 y 5).

Acceso a las Vías de Comunicación. A esta capa se le asignó un valor porcentual máximo de 30 y corresponde con la integración de la red de caminos (ajustada según la verificación en campo). Este estrato se trabajó generando modelos



Fuente: elaboración propia.
Figura 5. Modelo de Síntesis del Acceso a Bienes y Servicios (MSABS).

de cálculo espacial para determinar la distancia de cada punto del área de interés (también levantados durante el trabajo de campo), respecto a las vías de acceso, e incluyendo las características de las vías. Con este análisis fue posible tener una capa de información que muestra las condiciones de accesibilidad de cada punto respecto a la red de caminos. Si el punto está sobre la red se consideró potencialmente "apto"; si se localiza a una distancia que puede recorrerse a pie, donde el tiempo invertido no sea mayor a los 15 minutos y la distancia no supere los 500 m, entonces se clasificó como "apto con restricciones"; y, finalmente, será "no apto" cuando el punto esté a más de 15 minutos caminando o a una distancia superior a los 500 m.

Disponibilidad de Agua. La red hidrográfica fue el insumo de esta capa de información, conjuntamente con las de distribución de manantiales, norias y pozos y la de localidades que cuentan con el servicio y abasto de agua. El objetivo fue localizar los puntos de acceso al agua y la distancia de éstos respecto a los sitios de interés del CVRT. En los casos que el agua se encontrará situada sobre el camino o a una distancia no mayor a 500 m, se consideró como un lugar "apto"; a una distancia mayor a 500 m y menor a un kilómetro, se calificó como "apto con restricciones"; y para los casos en los que se superaba la distancia de un kilómetro, la calificación fue de "no apto". Respecto al MSABS a la Disponibilidad de Agua le correspondió un valor máximo porcentual de 35 (Figura 3).

Acceso a Bienes y Servicios. Se consideró la gama de servicios que podrían encontrarse en localidades mayores de 100 habitantes, como son: asistencia médica básica, farmacia, agua potable, albergues, hoteles, fondas, abarrotes, entre otros. Se diseñó un modelo de estimación espacial y se calculó la distancia de cada uno

de los núcleos poblacionales de 100 habitantes y más respecto al CVRT. Después se clasificaron las áreas resultantes en "aptas", "aptas con restricciones", "no aptas". El valor porcentual máximo que guarda esta capa de información para la integración del MSABS es de 35%.

Modelo sintético para el diseño de mapas de intervención del CVRT. Una vez clasificadas cada variable y generados los respectivos modelos sintéticos: MSMF y MMSABS, se procedió a integrarlos en uno, denominado Modelo Sintético para el Diseño del Mapa de Intervenciones (MSDMI) del CVRT. En éste se representaron los sitios que el modelo arrojó como idóneos para la construcción de albergues, áreas de descanso, fuentes de agua, miradores y la ubicación de las señales del camino. Cabe decir que este resultado fue contrastado con el modelo que se generó con las opiniones de los actores locales (Figura 6). Además, se elaboró un mapa complementario al de ubicación de los miradores, el cual se refiere a los radios de visibilidad desde los puntos considerados como los sitios idóneos.

La estrategia de validación y el mapa de intervención del CVRT

A efecto de validar los modelos, se partió del concepto de conocimiento-regulación (Del Rincón *et al*., 2003), mismo que busca integrar la experiencia acumulada de los agentes locales en la construcción de conocimiento técnico. De acuerdo con ello, se desarrollaron dos Talleres de Proyección y Consenso, respectivamente para el CVRT, uno se llevó a cabo en Atenguillo, el 8 de octubre de 2005, y el segundo en Ameca, el 6 de diciembre del mismo año. En ambos momentos los resultados recogidos fueron decisivos, en el primero se hizo un diagnóstico sectorial que se resume en un mapa de intervención construido por los propios actores. En el segundo momento, el trabajo se centró en la discusión y consenso respecto al mapa de intervención SIG y sus contenidos de intervención territorial.

Para la ejecución de la dinámica de trabajo se preparó un cuaderno de trabajo estructurado en seis partes: *a) Presentación con el entrevistado*, para la exposición del proyecto y sus alcances. *b) ¿Qué camino queremos?*, como una primera aproximación se lanzó esta pregunta, a la que la mayoría contestó que lo que se busca es una ruta ante todo "religiosa". *c) Diagnóstico sectorial,* en este caso se abordaron temas concretos en función del sector, de tal suerte, el del religioso se centró en las expectativas respecto al culto a la Virgen, con referencia al mantenimiento de las costumbres y tradiciones y sobre el reconocimiento de los beneficios espirituales. *d) Estatus actual,* siguiendo el esquema sectorial se continuó haciendo la inspección de los diferentes temas, con la finalidad de matizar los primeros comentarios obtenidos. *e) Proyectos,* de acuerdo con el perfil de cada agente se procedió al desarrollo de planeación de proyectos, los cuales también se ajustarían a los ni-

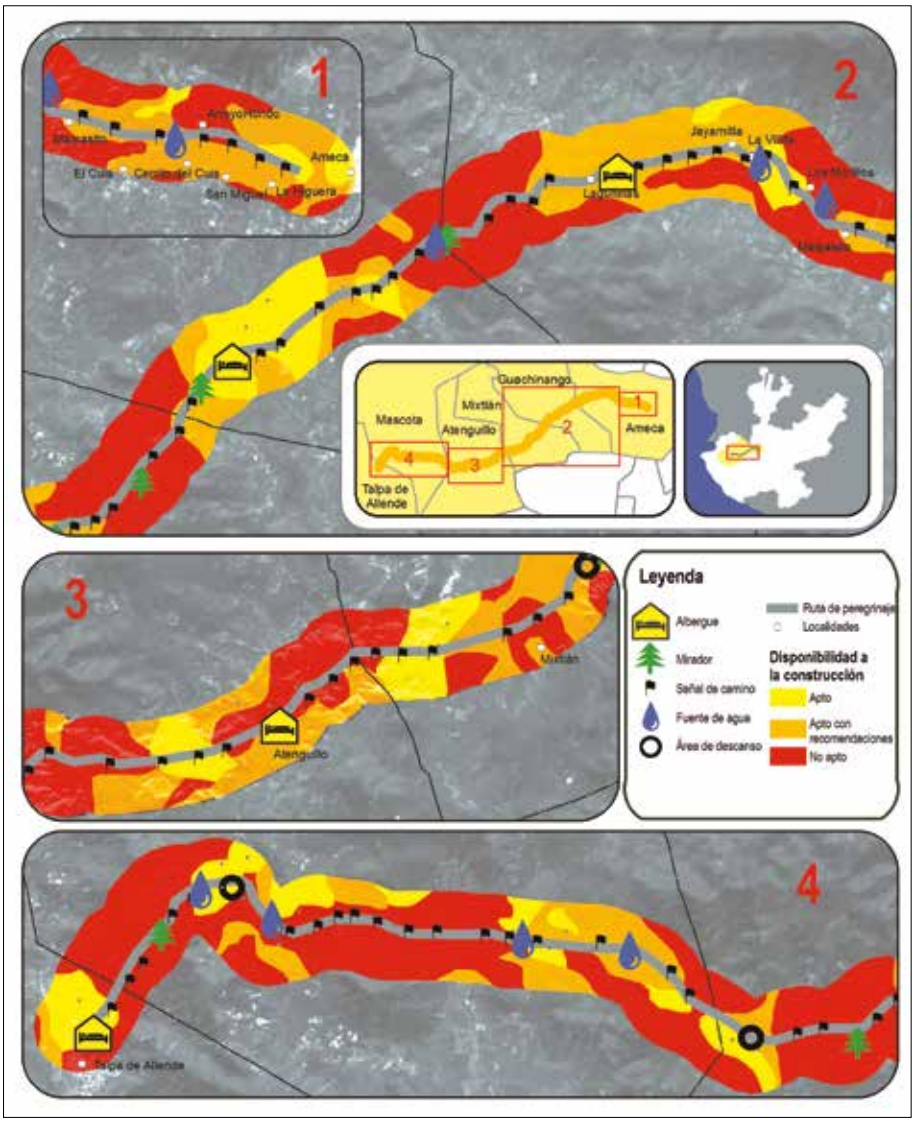


Figura 6. Mapa consensuado de intervención del CVRT.

veles sectoriales. *f) Mapa de intervención,* sobre un acetato, los agentes hicieron los ajustes al mapa del CVRT y las intervenciones, reconociendo problemáticas y requerimientos.

Respecto al modelo de intervención de los actores, cabe decir que todas las propuestas se orientaron hacia la mejora de la calidad de los servicios básicos para la atención del peregrino; así como la infraestructura que facilite desempeñar, tanto a prestadores como a peregrinos sus diferentes roles. Asimismo, se identificaron a lo largo CVRT zonas de potencial turístico, otras donde hay mucha basura y que es difícil recolectarla, donde hace falta vigilancia y las que presentan peligro por lo abrupto del camino (Figura 4).

Estos datos también se incorporaron al SIG y se contrastaron con los modelos automatizados, generando un modelo final del que se desprende el mapa de intervenciones. En éste se asignó como "apto" aquéllos con valores superiores a 95% (es decir, que reunían 95% o más de las condiciones favorables); como "apto con restricciones" a los calificados entre 80 y 95%; y, como "no apto" a los que resultaron con menos de 80%.

De manera concreta, se estableció la necesidad de construir cuatro albergues, cada uno con tres módulos de atención a los peregrinos, áreas de descanso al aire libre, sanitarios y regaderas; tres áreas de descanso en lugares intermedios entre albergues y de alto desgaste físico; ocho fuentes de agua en los sitios que las condiciones físicas lo permitan; seis miradores en puntos de alta calidad paisajística; y ciento veintitrés señalamientos en lugares estratégicos para la orientación del peregrino hacia Talpa de Allende (Figura 6).

Por último, se comenta, como un aspecto relevante de este proyecto, el apoyo de las autoridades municipales para la conformación del grupo de actores locales, quienes fueron elegidos para opinar sobre las intervenciones en el CVRT por ser los conocedores del lugar; además, el hecho de que posteriormente se incrementó el grupo con otros participantes que se interesaron en el proyecto.

Discusión y Conclusiones

Para la toma de decisiones sobre la localización óptima de servicios de interés público se utilizaron principalmente dos métodos de análisis espacial: modelos de contraste y modelos de integración. En los primeros se diseñaron varios modelos sintéticos, privilegiando en cada uno algún aspecto de interés (social, estético, recreativo, ambiental, etc.). Los mapas muestran a los tomadores de decisiones las áreas donde existe congruencia de intereses y aquéllas otras en las que pue-

de haber conflicto. Por su parte, en los modelos de integración se requiere que previamente los tomadores de decisiones den sus opiniones y valoren los elementos deseables y no deseables. Cuando estos valores son procesados en el SIG, el resultado es un mapa único en el que se integra la valoración de las diferentes opciones. Ambos modelos, si se llevan a cabo oportunamente, pueden revelar eficazmente las coincidencias entre los tomadores de decisiones, quienes valorarán las opiniones y las considerarán como punto de partida para realizar gestiones eficaces (O'Looney, 2000).

En nuestro caso, en el ejemplo de aplicación SIG-GPS-Cartografía que se presenta, se ha intentado incluir ambos planteamientos. El propósito fue la generación de tres modelos sintéticos automatizados orientados a precisar los sitios adecuados para la ubicación de albergues, áreas de descanso, fuentes de agua y de señalización para el CVRT. Estos resultados fueron contrastados y ajustados con el modelo de infraestructura básica que se construyó con las respuestas de los actores locales, quienes, como conocedores de la ruta, de sus tradiciones, y de los usos y costumbres de los peregrinos, ofrecieron aportaciones muy importantes para este proyecto. Por su parte, los peregrinos, a través de la encuesta, manifestaron qué tipo de servicios se requieren para mejorar las condiciones de peregrinación. Asimismo, a través de sus respuestas fue posible entender las particularidades etnográficas de la ruta religiosa-cultural en cuestión.

Todos estos referentes fueron considerados al momento de generar el mapa de intervenciones de servicios y equipamientos básicos para el CVRT, con la finalidad de obtener un producto cartográfico que se apegue a los requerimientos reales. Cabe decir que este ejemplo de planeación demuestra que, si bien las nuevas tecnologías de información geográfica son de gran ayuda, para llegar a modelos más apegados a la realidad, es necesario tener en cuenta el mayor número de aportaciones posibles de los conocedores de la problemática. En nuestro caso, los referentes historiográficos fueron de gran importancia, así como los resultados de las encuestas y de las entrevistas a profundidad realizadas a los actores locales, y sobre todo, el contar con el modelo cartográfico que para el CVRT dichos actores generaron. Toda esta información ahora se dispone en un SIG, el que puede seguir alimentándose hasta que funcione como un verdadero Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE).

Los SADE, de acuerdo con Bosque (2001:141) vienen a mejorar los SIG, ya que amplían sus capacidades de exploración de los problemas, de generación de alternativas y de evaluación de soluciones. Un SADE se define como el "conjunto de elementos, tanto físicos (computadora, periféricos, etc.) como lógicos (programas, datos, procedimientos, etc.) que proporcionan el entorno adecuado para la

adopción racional de decisiones sobre problemas espaciales" (*Ibid.*). Al respecto Santos (2003) señala que estos sistemas aportan un conjunto variado de posibilidades en la gestión de bases de datos, como son: *a)* un tratamiento estadístico que permite identificar la estructura espacial subyacente; *b)* la generación de informes relativos al análisis de la realidad; *c)* gestión de modelos matemáticos que ayudan a evaluar el problema planteado, y *d)* la existencia de una interfase con el usuario, desde la que se ofrece una comunicación sencilla y ágil con el sistema. De tal forma, el usuario, no necesariamente conocedor de sistemas pero sí de la temática abordada, puede generar fácilmente informes y gráficos, gestionar bases de datos, realizar modelos espaciales y aplicar técnicas de análisis multicriterio. Esto hace que se deba construir un SADE para cada temática o problemática concreta.

Por último, cabe resaltar que a raíz de los resultados obtenidos, surgieron nuevas problemáticas que requieren pronta atención: *a)* el programa de intervenciones para el mejoramiento del CVRT puede traer modificaciones más o menos sutiles del significado religioso del recorrido, ya que además del peregrinaje religioso puede promover la actividad turística distinta de aquel fin; *b)* otra problemática, ligada a la anterior, es sobre la estrategia intermunicipal para la recogida de los desechos sólidos, y *c)* asimismo, la necesidad de dar a conocer el camino mediante una estrategia de difusión conjunta entre los municipios involucrados. Estos puntos podrán ser atendidos en próximas tareas de seguimiento y apoyo académico aprovechando la colaboración y disponibilidad que las autoridades municipales han mostrado en todo el proceso del diseño del Plan Maestro. Así que el primer paso que se dará será ampliar el banco de datos espaciales con los resultados de nuevas encuestas a peregrinos, las cuales se llevarán a cabo durante la romería mayor (Semana Santa). Con ello se propone ampliar el SIG-CVRT, hasta convertirlo en un SADE del CVRT que puedan manejar directamente los actores locales interesados.

Referencias

Anderson, E. A. (2005), "Overview", in Fleming, C. (ed.), *The GIS Guide for Local Governments Officials*, ESRI Press, pp. 1-7.

Bosque Sendra, J. (1992), *Sistemas de Información Geográfica*, Ed. Rialp, Madrid.

Bosque Sendra, J. (2001), "Planificación y gestión del territorio. De los SIG a los Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE)", *El Campo de las Ciencias y las Artes*, núm. 138, Servicio de Estudios del BBVA, Madrid, pp. 137-174.

Burrough, P. A. (1986), *Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment*, Oxford University Press, USA.

Del Rincón, D., J. Arnal, A. Latorre y A. Sans (1995), *Técnicas de Investigación en Ciencias Sociales*, Dykinson, Madrid.

Miranda Guerrero, R., J. Rodríguez Rodríguez y M. I. Ramírez Ramírez (2006), "Ruta del Peregrino", en González-Huerzo, A. (ed. y coord.), *Serie Rutas Culturales de Jalisco,* Gobierno del Estado de Jalisco, núm. 3, México.

O'Looney, J. (2000), *Beyond Maps. GIS and Decision Making in Local Government*, ESRI Press, USA.

Ordoñes Galán, C. y R. Martínez-Alegría López (2003), *Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales*, Ra-Ma, Madrid, España.

Saaty, T. (1997), *Toma de decisiones para líderes: el proceso analítico jerárquico para la toma de decisiones en un mundo complejo,* RWS Publications, Pittsburgh, USA.

Sancho Comíns, J. (2001), "Información geográfica como base para la toma de decisiones", *El Campo de las Ciencias y las Artes*, núm. 138, Servicio de Estudios del BBVA, Madrid, pp. 3-22.

Santos Preciado, J. M. (2003), "Técnicas cuantitativas para la toma de decisiones territoriales", en García Cuesta, J. L. (ed.), *Ciencia y técnica de la información geográfica*, Ediciones Dos Soles, Burgos, España, pp. 27-84.

Sugio, K. (2005), "A consideration on the definition of the setting and management/protection measures for cultural routes", *Proceedings ICOMOS 15th General Assembly and Scientific Symposium*, Section IV. Xi'an, China, 17-21 October 2005.

Wataru, O. (2005), "A case study of practical method of defining the setting for a cultural route", *Proceedings ICOMOS 15th General Assembly and Scientific Symposium*, Section IV. Xi'an, China, 17-21 October 2005.

Capítulo 12. La producción pesquera en el Golfo de México y su relación con los procesos oceanográficos a partir de datos satelitales

Olivia Salmerón García
Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE)
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Este capítulo pretende mostrar el comportamiento de tres variables en el Golfo de México, la producción pesquera en peso vivo, la temperatura superficial del mar y la clorofila-a. La primera es de tipo biológico y las últimas describen dos de las características físicas del agua marina que influyen en los organismos y por lo tanto en su distribución y abundancia. La producción en peso vivo se refiere al peso total del producto al momento de obtenerse de su medio natural; se determina con base en el peso desembarcado, aplicando factores de conversión establecidos por el Instituto Nacional de Pesca, de acuerdo con la metodología empleada por la FAO. Por otro lado, el volumen de producción pesquera no sólo depende de la distribución y abundancia de las especies sino también de variables de tipo social, económico y de organización, es decir, cómo se organizan las pesquerías; el tipo de pesquería desde artesanal hasta industrial; el número y condiciones de las embarcaciones; el cuidado que se tenga al registrar el volumen de captura; las especies capturadas y el puerto donde se lleve a cabo el desembarque.

La temperatura superficial del mar es uno de los parámetros más estudiados debido a que es fácilmente medido desde sensores a bordo de plataformas satelitales. Para algunos científicos esta temperatura se limita a la piel de océano, es decir, a una capa con un grosor de milímetros, mientras que para otros puede ser de centímetros o hasta de un metro. Lo cierto es que refleja las condiciones de temperatura por debajo de la piel del océano.

La concentración de clorofila-a es otro parámetro que puede medirse a través de sensores montados en satélites. Los datos que dichos sensores proporcionan, a

diferencia de la temperatura superficial, corresponden a la concentración de clorofila-a en la columna de agua hasta una profundidad que depende de la turbidez del agua. La clorofila-a es una sustancia contenida en el fitoplancton, pequeñas plantas marinas que convierten la luz solar en alimento a través del proceso de fotosíntesis; debido a que el fitoplancton es la base de la cadena alimenticia, su presencia es un factor determinante en la producción pesquera.

El capítulo es una primera aproximación al estudio de la relación temperatura superficial del mar y clorofila-a con la producción pesquera en peso vivo, en el Golfo de México y Mar Caribe (Figura 1). En principio se da un panorama de la pesca en el Golfo y Mar Caribe Mexicano, posteriormente de la temperatura superficial del mar y de la concentración de clorofila-a; por último, se analizan las tres variables con el fin de establecer una relación entre ellas y se incorporan a un SIG para iniciar una base de datos de los mares mexicanos que permita organizar, analizar y visualizar datos a nivel costero y marino. En la medida en la cual se vaya alimentando la base de datos oceanográficos será posible sobreponer capas de información de parámetros físicos como los que aquí se analizan y otros como la batimetría, áreas contaminadas, áreas influenciadas por descargas de ríos, recursos minerales, localización y captura de especies, etc., de tal manera que sea posible hacer estudios de ordenamiento, similares a los que se realizan en la parte terrestre.

Figura 1. Área en estudio.

Antecedentes

La pesca en el Golfo de México y Mar Caribe Mexicano

La Carta Nacional Pesquera (2000) menciona que el Golfo de México y el Mar Caribe contribuyen con un 23% del volumen de pesca en el ámbito nacional, de este porcentaje el estado de Veracruz aporta el 40% del volumen de captura. Las principales pesquerías son: camarón, tiburón, atún, mero, pulpo, langosta, caracol rosado y escama (INE-SEMARNAT, 2004:760-761). De acuerdo con las estadísticas de los Anuarios de SAGARPA-CONAPESCA de 1996 al 2000, en la Figura 2 se observa que el año con mayor captura en peso vivo fue 1996 (barras de total) y el de menor captura fue el 2000. Se confirma que el estado con mayor producción es Veracruz, lo cual no necesariamente significa que la mayor parte de la captura sea en sus costas, sin embargo, es muy probable que el número de embarcaciones de Veracruz, que supera al total del resto de los estados del Golfo esté relacionado directamente con el volumen de producción. La Figura 3 representa la producción promedio mensual en peso vivo por año así como el promedio mensual climático, es decir, el promedio de todos los eneros, febreros y así sucesivamente. El promedio de captura estacional es de 27 230 toneladas en primavera-verano y de 28 572 en otoño-invierno. Sin embargo, los meses con mayor captura son de agosto a diciembre, es decir, finales de verano y otoño.

Procesos oceanográficos

En el Golfo, la circulación oceánica está dominada por la Corriente del Lazo que antes de penetrar al Golfo recibe el nombre de Corriente del Caribe, se caracteriza por tener aguas cálidas y de alta salinidad (36.7 unidades prácticas de salinidad, ups), además de ella se desprenden unos giros que se desplazan hacia el oeste del Golfo hasta colisionar con la plataforma de Tamaulipas (Aguirre, 2002), el resto sale al Atlántico por el Estrecho de Florida y recibe el nombre de Corriente del Golfo. Los giros anticiclónicos que se desprenden de la Corriente del Lazo se dirigen hacia el oeste a una velocidad de 6 km –día (Cochrane, 1972), es decir, 6.94 cm/seg, o 5 cm/seg de acuerdo con William (1999); Hamilton (1992) observó velocidades entre 30 y 50 cm/seg. Como respuesta a la formación de giros anticiclónicos se forman giros ciclónicos que generan descensos de agua con temperaturas frías en relación con las circundantes, los frentes que se forman entre ambos giros favorecen la presencia de nutrientes y de la productividad primaria (Biggs, 1992; Figura 4).

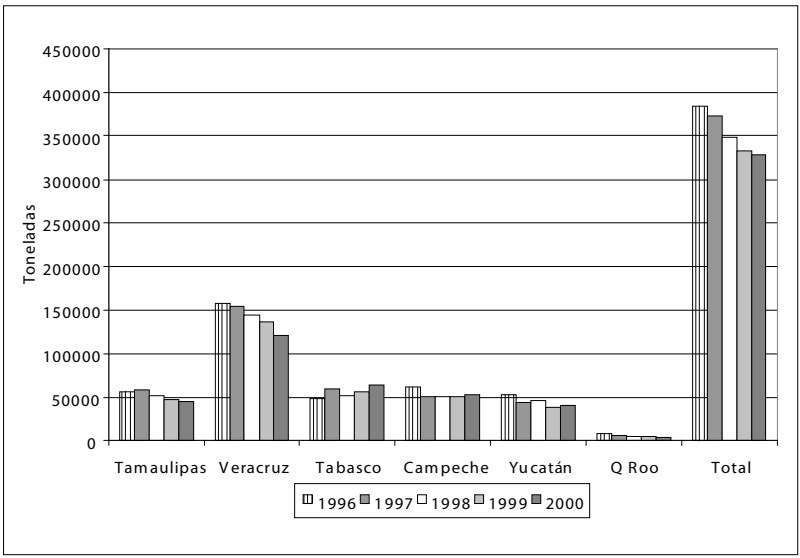


Figura 2. Serie histórica de producción en peso vivo, por entidad federativa.

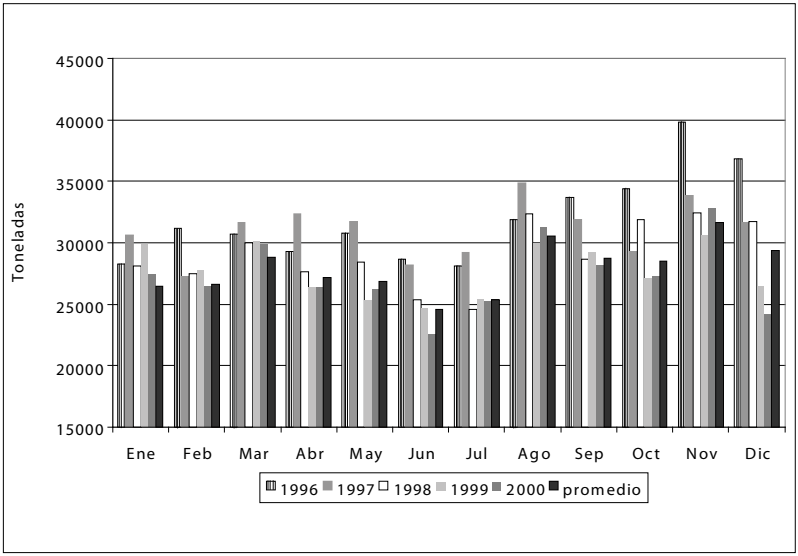


Figura 3. Serie histórica de la producción mensual en peso vivo, en el Golfo de México y en el Mar Caribe.

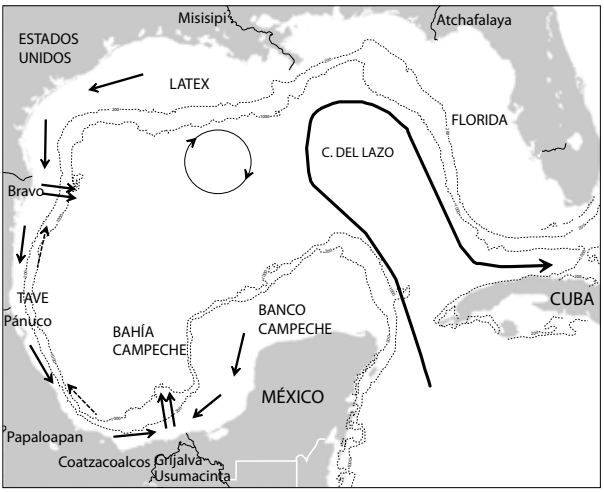


Figura 4. Procesos oceanográficos. Las flechas punteadas indican el cambio en la circulación en primavera-verano

La circulación costera está más influenciada por la estacionalidad de los vientos que en otoño-invierno son del norte y noreste también conocidos como "Nortes", mientras que en primavera-verano son del sureste o "Sures", de tal forma que se presenta una circulación estacional a lo largo de las costas desde Florida hasta Yucatán. Zavala *et al*. (2003b) distinguen tres zonas: las plataformas de Louisiana-Texas (LATEX), Tamaulipas-Veracruz (TAVE) y Banco de Campeche.

En la zona de LATEX la circulación es hacia el suroeste en las estaciones de otoño-invierno hasta unirse con la zona de TAVE para finalmente alcanzar el sur del Golfo de México. En primavera-verano la circulación continúa siendo hacia el suroeste pero sólo llega hasta Tamaulipas. A finales de invierno la zona de TAVE invierte su circulación y se dirige hacia el norte hasta encontrarse en Texas con la Corriente proveniente de Louisiana en donde forma una zona de convergencia. Como resultado de esta convergencia se favorece el transporte de sedimentos hacia la parte oceánica. Es cierto que en general la circulación sobre la plataforma interna de LATEX es hacia el suroeste, sin embargo, en la plataforma externa hay una corriente débil hacia el noreste (*Ibid*.).

La descarga de los ríos Mississippi y Atchafalaya es importante en la medida en que caracterizan el agua superficial de LATEX tanto por su volumen como por la aportación de agua dulce, es decir, agua fría y de baja salinidad (Zavala, 2006). De la misma manera el efecto de los ríos Pánuco, Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva-Usumacinta es importante en los meses de verano en la plataforma TAVE y en la Bahía de Campeche por el aporte de agua dulce y la descarga de sedimentos.

Como ya se mencionó, la circulación en la plataforma de Tamaulipas y norte de Veracruz es hacia el sur en otoño-invierno y hacia el norte en primera-verano como resultado de las variaciones en la dirección de los vientos. Cuando la circulación es hacia el sur, el agua que es advectada desde las costas de Louisiana y Texas (LATEX) es fría y va creando frentes a su paso por la plataforma hasta llegar al sur de Veracruz. Otro elemento a considerar son las inversiones en la temperatura debidas a la advección de agua fría y de baja salinidad. En primavera-verano a pesar de que la circulación se invierte, hacia el norte (Figura 4 flechas discontinuas), se observan temperaturas bajas en algunas zonas costeras, comparadas con el agua cálida del Caribe que penetra en el Golfo, así como el calentamiento de la capa superficial. Algunos autores interpretan estas bajas temperaturas como un fenómeno de surgencia ocasionada por los vientos del sureste (Zavala, 2006), mientras que otros lo atribuyen a la interacción entre giros ciclónicos y anticiclónicos (Brooks y Legeckis, 1982). También se muestra una fuerte estratificación en la zona oceánica debida al calentamiento de la capa superficial y a la penetración de aguas con baja salinidad provenientes de los ríos Grijalva-Usumacinta, Coatzacoalcos, Papaloapan y Pánuco (Zavala, 2003b).

El Banco de Campeche presenta dos fenómenos importantes, el primero es la convergencia entre la Corriente proveniente de TAVE y la corriente costa-arriba de la bahía de Campeche; el segundo es la surgencia de Yucatán. La convergencia se forma por la presencia de una corriente litoral con dirección este-oeste (Monreal *et al*., 1992) en el sur de la Bahía de Campeche. En otoño-invierno esta Corriente se dirige hacia el sur desde LATEX hasta encontrarse con la Corriente de la bahía de Campeche provocando transporte de sedimentos fuera de la plataforma. Dicho transporte se incrementa por el efecto de la descarga de agua dulce del sistema Grijalva-Usumacinta y del río Coatzacoalcos, que en esta época del año es mayor que en primavera-verano. El segundo fenómeno, la surgencia de Yucatán, se repite a lo largo del año, como se observa tanto en imágenes de temperatura como de color del mar, sin embargo, diferentes autores la interpretan como resultado de factores distintos, de tal forma que algunos hablan de una surgencia topográfica debida al efecto de la fricción con el fondo, lo que obliga a la elevación de la isoterma de 22.5° C (Merino, 1997); Ruíz (1979) habla de una surgencia dinámica y otra eólica, la primera es ocasionada por diferencias en la presión hidrostática en la columna de agua y para conservar el equilibrio de la densidad se produce un ascenso de agua subsuperficial, mientras que la segunda es resultado del efecto de Coriolis y la fricción del viento sobre la superficie del mar.

La plataforma oeste de Florida tiene una dinámica estacional definida por los vientos, el río Mississippi y la Corriente del Lazo. Los vientos favorecen fenó-

menos de surgencia y de hundimiento dependiendo de si provienen del norte o del este y sureste, respectivamente. En invierno la circulación es hacia el sur con condiciones favorables para la aparición de surgencias, mientras que en verano la circulación es hacia el norte. Primavera y otoño son estaciones de transición, ya que marcan el cambio en la dirección de las corrientes. Por su parte, las descargas de ríos como el Mississippi, aportan nutrientes que contribuyen a la formación de una pluma con altas concentraciones de clorofila, temperaturas frías y bajas concentraciones de salinidad, en primavera, se localiza en la zona de Big Bend donde termina la plataforma y comienza el talud continental; este fenómeno es conocido como Green River. También en primavera, de marzo a mayo una parte de la descarga del Mississippi se dirige al este y luego hacia el sur hasta la zona conocida como Dry Tortugas. Otro factor que influye en esta fuerte corriente hacia el sur es la penetración de la Corriente del Lazo cuando ésta alcanza su posición más al norte o cuando se desprenden los giros (Wiesberg *et al.*, 2005).

Metodología

La información de la producción pesquera se tomó básicamente de los anuarios estadísticos de pesca mientras que la temperatura y la clorofila, de imágenes satelitales NOAA-AVHRR (Nacional Oceanic & Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer) y OrbView2-SeaWiFS (Sea-wiewing Wide Field-of-view), respectivamente. El procesamiento de las imágenes para la obtención de las temperaturas y de la concentración de clorofila-a diarias así como los promedios mensuales y estacionales se hizo con TeraScan© SeaSpace Co. En una segunda etapa se exportaron los promedios a un SIG (ArcView© ESRI) para ir conformando un SIG de los mares mexicanos.

Etapas de procesamiento

Imágenes AVHRR. La primera etapa consiste en la recepción y almacenamiento de las imágenes en formato crudo (raw), la segunda etapa se refiere a la calibración de los datos, es decir, la transformación de los datos a porcentaje de albedo para los canales 1 y 2, así como a temperatura de brillo en grados Celsius para los canales 3, 4 y 5. La aplicación de filtros para la eliminación de ruido es otra parte del proceso de calibración. Como tercer paso se obtienen las temperaturas en grados Celsius a través del algoritmo MCSST de cada imagen y después se calculan los promedios mensuales que a su vez se utilizan para obtener los compuestos estacionales. Por último se lleva a cabo un ajuste de la imagen mediante

un proceso de "navegación" para hacer una corrección geométrica y aplicar la proyección cartográfica Normal de Mercator.

En el caso de las imágenes SeaWiFS, la primera etapa del procesamiento consiste en recibirlas y almacenarlas durante quince días, aproximadamente, hasta que se habilita una clave para desencriptarlas y poder ingestarlas en formato "Terascan". La segunda etapa es la calibración y navegación de las imágenes. La tercera es la aplicación del algoritmo de la NASA(1), para la obtención de clorofila-a (Aguirre, 2002), por imagen y posteriormente se obtiene el compuesto mensual y el estacional. Por último se hace la corrección geométrica utilizando la proyección cartográfica Normal de Mercator.

$$\text{Chla} = -0.040 + 10^{(0.341-3.001X+2.811X2-2.041X3)}, \qquad (1)$$

donde Chla es la concentración de clorofila-a en mg/m^3 y X es el cociente de las bandas 3 y 5 de SeaWiFS.

Temperatura superficial del mar

La temperatura superficial del Golfo de México varía a lo largo del año en una especie de vaivén entre las aguas frías del norte y las cálidas del sur y del Caribe, pero se pueden distinguir claramente dos patrones uno en primavera-verano, de abril a septiembre, y otro en otoño-invierno, de octubre a marzo; el primer periodo es de calentamiento y el segundo de enfriamiento de la Tierra (García, 1983:19-20). En primavera-verano se presentan temperaturas superficiales del mar entre 24.1 y 30.8° C, mínima y máxima, respectivamente, de acuerdo con los datos que arrojan las imágenes a todo lo largo y ancho del Golfo y del Caribe, mientras que en otoño-invierno se presentan temperaturas desde 11.7° C en el norte hasta 28.4° C en el sur del Golfo y el Mar Caribe, como se aprecia en el Cuadro 1, en donde se describen la moda, mínima y máxima de cada periodo estacional, sin embargo, cabe hacer notar que para otoño-invierno se presentan dos modas, la primera corresponde al Golfo de México (GM) y la segunda al Caribe (MC), debido al cambio de las condiciones climáticas e hidrológicas en el Golfo por el efecto de los vientos fríos del norte y las descargas de agua dulce y de baja salinidad de los ríos.

Primavera-verano

Como se menciona en el párrafo anterior, el Golfo presenta un patrón de temperatura homogéneo con valores muy elevados alrededor de 27° C, excepto en

Cuadro 1. Temperatura superficial del mar, moda, mínima y máxima en primavera-verano y otoño-invierno, para el Golfo de México (GM) y Mar Caribe (MC).

AÑO	PRIMAVERA-VERANO °C			OTOÑO-INVIERNO °C			
	Moda	Mínima	Máxima	Moda GM	Moda MC	Mínima	Máxima
1995				23.0	26.2	11.7	27.6
1996	27.9	25.0	30.8	25.5	27.2	15.9	28.3
1997	28.8	24.6	30.8	25.0	27.5	15.0	28.4
1998	27.5	25.2	30.6	24.7	26.9	16.4	27.9
1999	27.7	25.1	30.1	25.0	26.4	17.7	27.4
2000	27.9	25.0	29.8	24.9	26.6	14.7	27.6
2001	27.2	24.1	29.5				

algunas zonas muy cercanas a la costa en donde bajan aproximadamente 2° C con respecto a las aguas circundantes, éstas se localizan en la desembocadura del río Pánuco y en la surgencia de Yucatán, como se observa en la imagen de primavera-verano de 1996 (Figura 5). El área relativamente más fría que describe una pluma a partir de la desembocadura del Pánuco se extiende hacia el norte entre 400 y 750 km cuando inicia desde Veracruz porque en otras ocasiones inicia en las costas de Tampico. La surgencia de Yucatán es otro fenómeno que también se observa a pesar de ser temporada de calor, con una temperatura relativamente fría hasta de 27° C. Las surgencias son afloramientos de agua relativamente fría y rica en nutrientes ocasionados por distintos mecanismos, eólicos, topográficos o dinámicos que favorecen las pesquerías.

Otoño-invierno

En el Golfo de México, de acuerdo con las corrientes, giros, surgencias y otros fenómenos que se ven reflejados en la temperatura superficial del mar, en la imagen de otoño-invierno de 1997 (Figura 6) se distinguen la Corriente del Lazo, el frente hidrológico (Pérez *et al*., 1996), que se observa a partir de la surgencia de Yucatán, entre la corriente del Lazo y el agua de la plataforma, el agua cálida de la bahía de Campeche, la corriente de Tamaulipas y por último la parte central del Golfo, en donde se presentan los giros anticiclónicos llamados "Eddies". Todos estos fenómenos son fácilmente observables en los meses fríos a través de las imá-

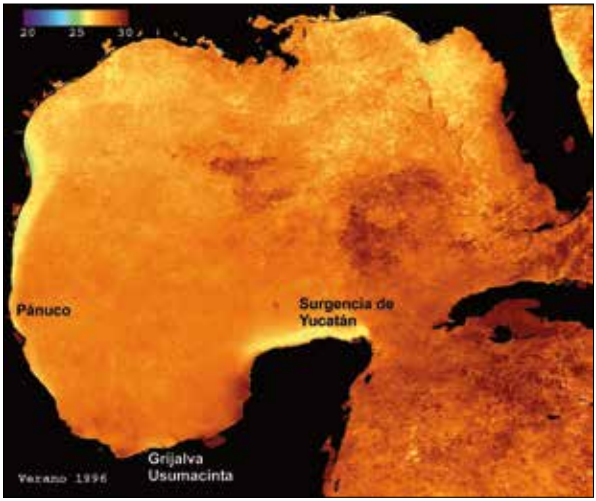


Figura 5. Compuesto del verano de 1996 de temperatura superficial del mar.

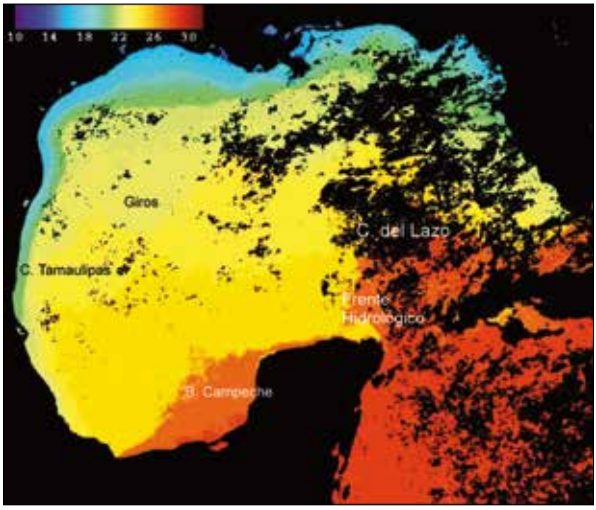


Figura 6. Compuesto del invierno de 1997 de temperatura superficial del mar.

genes satelitales, gracias a que presentan fuertes gradientes de temperatura; en cambio en verano, la capa superficial del Golfo incrementa su temperatura hasta alcanzar temperaturas cercanas a las de la corriente del Lazo, por lo cual presenta gradientes suaves que muestran un Golfo de México y Caribe "homogéneos". En general, en otoño-invierno se observan aguas frías, menores de 18° C, en el norte del Golfo así como un incremento gradual hasta la bahía de Campeche y Mar Caribe con temperaturas máximas entre los 27 y 28° C.

Concentración de clorofila-a

En el caso de la concentración de clorofila-a (Figura 7) no se aprecian estructuras como en el caso de la temperatura, tanto en los compuestos mensuales como en los estacionales sólo se distinguen dos áreas, la costera y la oceánica sin importar que sea primavera-verano u otoño-invierno.

La parte costera corresponde a toda la franja que presenta mayores concentraciones de clorofila-a. El ancho de esta franja varía a lo largo de la costa siendo mayor en la plataforma de Yucatán y menor en las costas de Tamaulipas y Veracruz. Las concentraciones son aproximadamente entre 0.5 y 6 mg/m^3, respectivamente. Dentro de esta zona destacan otras dos por sus altos valores: la primera es el Banco de Campeche que abarca desde la plataforma de Yucatán hasta el escarpe y cañón del mismo nombre, prácticamente hasta las costas de Tabasco. Al norte de Yucatán las altas concentraciones se extienden hasta 30 km, mientras que en la bahía de Campeche, hasta 100 km. La segunda área es la desembocadura del Mississippi, en donde también hay altas concentraciones, mayores a

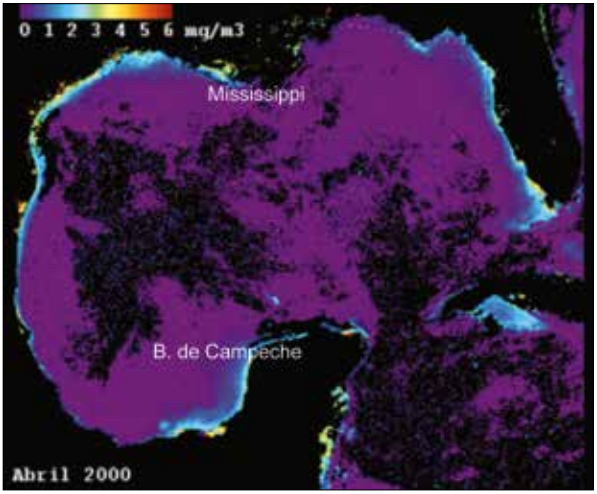


Figura 7. Compuesto del mes de abril del 2000, de la concentración de clorofila-a.

1 mg/m^3, que se extienden hasta 100 km de la costa. La parte oceánica presenta valores que no van más allá de 1 mg/m^3, por lo que es considerada como oligotrófica (Aguirre, 2002) y no refleja variaciones espaciales ni temporales. Melo *et al.* (2000) refiere concentraciones promedio de 0.12 mg/m^3 dentro de la zona de influencia de la corriente del Lazo, a partir de imágenes Coastal Zone Color Scanner, CZCS.

Integración en un SIG

El vínculo entre percepción remota (PR) y sistemas de información geográfica (SIG) es muy fuerte, tanto que hay funciones similares en ambos, por ejemplo las funciones estadísticas, las de procesamiento digital, básicamente la aplicación de algunos filtros simples y el cálculo de índices de vegetación, las funciones cartográficas como la georreferenciación y edición cartográfica, entre otras. Sin embargo, cada función tiene sus características particulares, por ejemplo, con un SIG no es posible hacer un análisis espectral o procesos estadísticos más elaborados, mientras que con un procesador de imágenes no es posible hacer un análisis espacial ligado a una base de datos. Considerando las ventajas y desventajas tanto de la PR como de los SIG es muy común que se trabaje con ambas herramientas a la vez y que haya un vaivén de la información para la obtención de resultados.

Por otro lado, la PR a través de las imágenes satelitales permite alimentar y actualizar constantemente a los SIG. Particularmente en estudios oceanográficos las imágenes son relevantes debido a que proporcionan información, algunas veces en tiempo real, de parámetros tan dinámicos como los marinos. La incorporación de las imágenes a un SIG requiere en primer lugar que éstas sean un producto derivado como la temperatura superficial o la concentración de clorofila-a, a menos que se necesite una imagen de radiancias, y que estén georreferenciadas. En segundo lugar deben tener un formato que sea compatible y que permita desplegarlas correctamente. En este trabajo las imágenes AVHRR y las SeaWiFS, en formato TeraScan y con datos tipo flotante (4 bytes), tuvieron que convertirse a formato binario y datos tipo short (2 bytes). En un archivo llamado "encabezado" se debe especificar el tamaño de la imagen en líneas y columnas, los parámetros cartográficos y el formato.

Resultados

En la Figura 8 se muestra el comportamiento de la temperatura superficial de mar y la concentración de clorofila-a en el Golfo de México y Mar Caribe, a

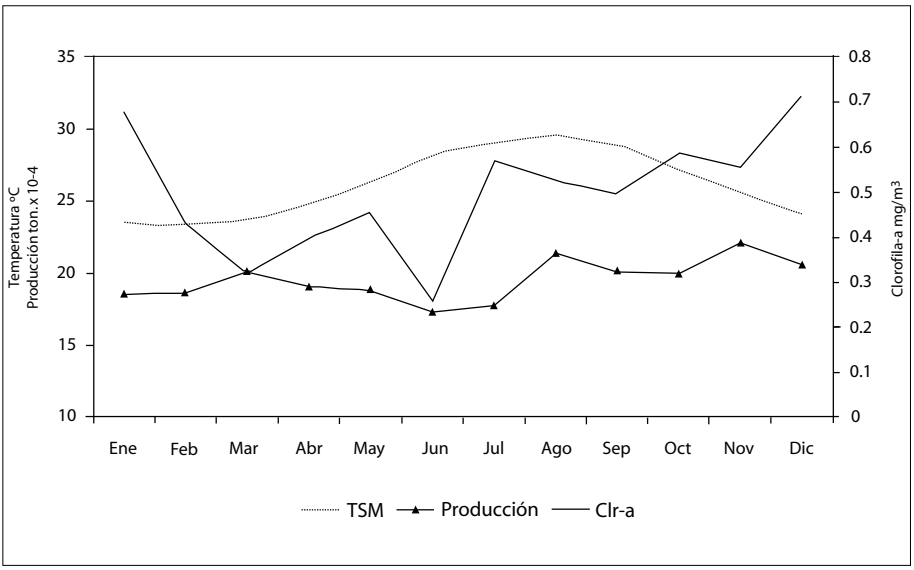


Figura 8. Temperatura superficial, clorofila-a y producción pesquera mensuales climáticas.

través de promedios mensuales climáticos de 1996 al 2000. La temperatura tiene un comportamiento bien definido, comenzando por un mínimo en febrero, un incremento paulatino hasta agosto y un descenso hacia los últimos meses del año. Por su parte, la concentración de clorofila presenta un mínimo en junio y un incremento hacia diciembre-enero pero con incrementos y descensos menores en los meses intermedios.

Relación de la producción pesquera con la TSM y la Chl-a

El promedio mensual climático de la producción pesquera de los cinco años de estudio presenta un comportamiento variable a lo largo del año, el mínimo se da en junio con 24 635 ton, mientras que el máximo se observa en noviembre, con 31 624 ton, aunque en general los meses de agosto a diciembre tienen las mayores capturas. Considerando estos últimos meses del año, la producción es ligeramente mayor cuando la temperatura comienza a descender y la concentración de clorofila-a se va incrementando (Figura 8). Las condiciones oceanográficas en agosto y septiembre están marcadas por vientos del sur-sureste que provocan surgencias en la plataforma de Tamaulipas y Veracruz. Estos fenómenos al hacer emerger agua subsuperficial ricas en nutrientes favorecen las pesquerías. En noviembre y diciembre la dirección de los vientos cambia y prevalecen los vientos

del norte ("nortes") los cuales al enfriar la capa superficial del océano ocasionan hundimiento por cambios en su densidad y provocan mezcla en la columna de agua que también favorece un ligero aumento en los nutrientes.

El mínimo de producción coincide con el mínimo de clorofila en junio, 0.25mg/m^3. Julio es el mes con el segundo mínimo de producción, sin embargo, la concentración de clorofila-a no es muy bajo, 0.57mg/m^3, habría que analizar más datos para saber qué es lo que ocasiona la baja productividad, puede ser que las altas temperaturas afecten a las especies pesqueras o bien que se necesiten más datos de clorofila-a, ya que los promedios mensuales no siempre fueron calculados con las 30 imágenes diarias de cada mes. A pesar de esto, junio, julio y agosto son meses en los cuales la temperatura superficial del mar se eleva hasta alcanzar un máximo y no hay fenómenos oceánicos que favorezcan el afloramiento de nutrientes ya que la columna de agua muestra una marcada estratificación y, en consecuencia, la productividad pesquera es baja.

Conclusión

Es difícil establecer una relación clara entre las condiciones oceanográficas y la captura más allá de lo que se observó en este trabajo. Con el análisis de los datos utilizados se puede decir que la producción aumenta a finales del verano cuando la temperatura comienza a descender y las concentraciones de clorofila-a aumentan. Este capítulo es un primer acercamiento al comportamiento de estas variables a nivel del Golfo de México y Mar Caribe, por lo tanto brinda un panorama general de las condiciones oceanográficas y de la producción pesquera que pueden servir de base para realizar estudios más concretos restringiendo el área en estudio a la plataforma continental, que es la zona donde se hacen las mayores capturas. También se pueden elegir especies de las que se tengan datos espaciales de su captura para tratar de establecer una relación más precisa con las variables físico-químicas del océano.

Referencias

Aguirre Gómez, R. (2002), *Los mares mexicanos a través de la percepción remota*, Colec. de Temas Selectos de Geografía de México (III.1), Instituto de Geografía, UNAM/ Plaza y Valdés, México.

Biggs, D. C. (1992), "Nutrients, plankton, and productivity in a warm core ring in the western Gulf of Mexico", *Journal of Geophysical Research,* vol. 97(C2), pp. 2143-2154.

Brooks, D. A. and R. V. Legeckis (1992), "A ship and satellite view of hydrographic features in the western Gulf of Mexico", *Journal of Geophysical Research,* vol. 87(C6), pp. 4195-4206.

Carta Nacional Pesquera (2000), *Diario Oficial de la Federación*, tomo DLXIII, núm. 20, México.

Hamilton, P. (1992), "Lower continental slope cyclonic eddies in the central Gulf of Mexico", *J. Geophys. Res.,* no. 97, pp. 2185-2200.

Cochrane, J. D. (1972), "Separation of an anticyclone and subsequent developments in the Loop Current (1969), Capurro, L. R. A. and J. L. Reid (eds.), *Contributions on the physical oceanography of the Gulf of Mexico*, Gulf Publishing Co., Houston, Texas, pp. 91-106.

García Amaro, E. (1983), *Apuntes de Climatología*, UNAM-UAM, México.

INE-SEMARNAT (2004), *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*, vol. 2, Caso, M., I. Pisanty y E. Ezcurra (comps.), Instituto de Ecología.

Melo, N., F. Mûller-Karger, S. Cerdeira Estrada, R. Pérez de los Reyes, I. Victoria, P. Cárdenas Pérez and I. Mitrani Arenal (2000), "Near-surface phytoplankton distribution in the western Intra-Americas Sea: the influence of El Niño and weather events", *Journal of Geophysical Research JGR-OCEANS,* vol. 105, no. C6, pp. 14029-14042.

Merino, M. (1997), "Upwelling on the Yucatán shelf: hydrographic evidence", *Journal of Marine Systems*, no. 13, pp. 101-121.

Monreal Gómez, M. A., D. A. Salas de León, A. Padilla Pilotze y M. A. Alatorre M. (1992), "Hidrografía y estimación de corrientes de densidad en el sur de la Bahía de Campeche, México", *Ciencias Marinas*, no. 18(4), pp. 115-133.

Pérez, R., I. Victoria del Río, M. Signoret Poillon, A. Gallegos García, I. Penié Rodríguez, C. Gil Varona, C. Bulit, N. Melo González, F. Mûller-Karger, S. Cerdeira Estrada y M. Merino Ibarra (1996), "Reporte de un frente hidrológico al NE de la Península de Yucatán. Manifestaciones físicas, químicas e hidrológicas", *Boletín de la Sociedad Meteorológica de Cuba*, vol. 2, núm. 1, julio, (ISSN-1025-921X). Publicación eléctrónica: cueyalt.uam.mx/uam/divisions/cbs/reporte.html

Ruiz, R. F. (1979), *Upwelling north of the Yucatán Peninsula*, M. Sc. Thesis, Texas A & M University.

SAGARPA-CONAPESCA (2000), *Anuario estadístico de pesca 2000*.

Weisberg, R. H., R. He, Y. Liu and J. I. Virmani (2005), "West Florida shelf circulation on synoptic, seasonal and inter-annual time scales", in Sturges, W. and A. Lugo-Fernández (eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: observations and models*, Geophysical Monograph Series 161, American Geophysical Union, 10.1029/161GM23, pp. 325-347.

Wiseman, W. J. Jr. and W. Sturges (1999), Chapter II 5, Physical Oceanography of the Gulf of Mexico: Processes that regulate ist biology, *The Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem. Assessment, Sustainability, and Management*, Kump, Herb; Steidinger, Karen; and Kenneth Sherman. Blackwell Science, Inc.

Zavala-Hidalgo, J., L. Morey, Steven and J. O'Brien (2003b), "Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model", *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 108(C12), 3389.

Zavala-Hidalgo, J., A. Gallegos-García, B. Martínez-López, S. L. Morey and J. O'Brien (2006), "Seasonal Upwelling on the western and southern shelves of the Gulf of Mexico", *Ocean Dynamics*, DOI 10.1007/s10236-006-0072-3.

Capítulo 13. Metodología para determinar zonas de peligro al ataque de la plaga de langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons Walter, 1870*) apoyados en sensores de alta resolución y SIG. Estudio de caso: la Huasteca Potosina-México

María Guadalupe Galindo Mendoza
Carlos Contreras Servín
Luis Olvera Vargas
Coordinación de Ciencias Sociales y Humanidades
Facultad de Geografía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Introducción

Tradicionalmente se denomina plaga a aquel fenómeno que afecta a la agricultura y que ocasiona pérdidas económicas. Según la FAO (2001a) una plaga es cualquier especie, raza o biotipo vegetal o animal o agente patógeno dañino para las plantas o productos vegetales. En los últimos 30 años, la propagación de especies invasivas y enfermedades emergentes ha sufrido un drástico aumento por la acentuación de los desplazamientos transfronterizos de bienes y personas, la liberalización del comercio y falta de políticas efectivas en las fronteras y los cercos fitosanitarios internacionales. Y aun cuando la presencia de plagas parece un problema técnico, administrativo, comercial y hasta político, también debe ponerse de manifiesto que el crecimiento de la superficie agrícola siniestrada por plagas (e incluso por fenómenos meteorológicos) se debe al progresivo impacto que se genera en el ambiente. Las plagas pasan de ser un fenómeno aislado, a ser vistos como partes del sistema, ya que los daños que ocasionan pueden ser económicos (pérdida del patrimonio, de la productividad, y de los ingresos e inversiones), físicos y de salud (utilización de pesticidas) y psicológicos (conmoción y pánico). Así de plaga pasa a ser un desastre fitosanitario (Galindo, 2006; Manilla, 1996; Mass-Krey, 1993), éstos incluyen a las plagas y enfermedades transfronterizas y

cuarentenarias que generan grandes pérdidas económicas a las zonas agropecuarias, sobre todo aquéllas con un modelo de producción extensivo y donde se ha arrasado con la vegetación primaria por completo, generalmente zonas de monocultivo. Según la FAO (2001a y b) una plaga transfronteriza es

> … aquella de gran importancia económica y comercial para la seguridad alimentaria para un considerable número de países; que se pueden propagar fácilmente a otros países y alcanzar proporciones de epidemia; y que exigen la cooperación entre varios países para su control y manejo, incluida su exclusión…

Las plagas transfronterizas pueden plantear la máxima amenaza inmediata en caso de invasión o brote o cuando recién se introducen en condiciones ecológicamente favorables, con pocos factores naturales que limiten su propagación y sin disponer de experiencia en su manejo. Suelen tener efectos desastrosos y, en la mayoría de los casos, afectan también con mayor gravedad a la población rural marginada.

En el caso de las plagas de insectos, éstas se caracterizan por sus grandes desplazamientos en búsqueda de alimentos y lugares adecuados para la reproducción y difícilmente se pueden controlar. Las langostas como insectos, son plagas transfronterizas, pertenecen a la superfamilia *acridiodea* que agrupa aquellos insectos comúnmente conocidos como chapulines, langostas y saltamontes, reconocidos porque sus patas posteriores son grandes y robustas por lo que están adaptadas para saltar; sus antenas son en la mayoría de los casos cortas, ovipositor corto, y el tímpano u órgano auditivo se sitúa en el aspecto dorso-lateral del primer segmento abdominal, los tarsos son invariablemente de tres segmentos; pueden ser alados, braquiópteros (alas cortas) o ápteros (Barrientos, 1990; Barrientos *et al*., 1992; Barrientos, 1998; Tinoco, 2001). Otro rasgo característico es el sonido que emiten cuando sus patas posteriores se frotan contra las tegminas produciendo un sonido conocido como estridulación y cuya función se asocia básicamente con actividades de cortejo y apareamiento.

Es también importante establecer la diferencia entre los términos langosta y chapulín; el término langosta se aplica a ciertos acridoideos migratorios cuyo tamaño es grande, regularmente rebasan los 10 cm de longitud o más, los cuales debido a un incremento de población cambian de comportamiento, pasan de la forma/fase solitaria a una forma/fase gregaria, cambiando posteriormente de color y forma (transformación fásica), y requieren tener una zona geográfica de multiplicación y gregarización definida (área gregarígena; Barrientos, 1990; Barrientos *et al.,* 1992, Barrientos, 1998; Garza, 2005 y 2005a).

Mientras que con el término de chapulín (*grasshopper*) se denomina a aquellos acridoideos cuyo tamaño es de pequeño a mediano, su longitud varía de 2 a 7 cm (aunque algunos pueden llegar a rebasar este promedio), que carecen de una transformación fásica y de un área geográfica de multiplicación y gregarización específica, no obstante que pueden presentar altas densidades, emigrar grandes distancias, tener conducta gregaria y ocasionar daños muy severos; en el caso del incremento de la población, puede ocurrir en cualquier lugar del área de distribución de la especie, si las condiciones climáticas y ecológicas son apropiadas, lo cual no sucede con las langostas que tienen su sitio bien delimitado para este aspecto. Por otro lado, existen ciertos cambios de coloración aunque con mayor frecuencia se asocian como un carácter de dimorfismo. En ambos casos, si los grupos formados se constituyen por individuos adultos, se les denominan mangas, y si están compuestos por inmaduros (ninfas) se les llaman bandas (Barrientos *et al*., 1992; Garza, 2005a y b). La clasificación taxonómica de las langostas es la siguiente (Cuadro 1).

Para la FAO (2001a), las especies de langostas que causan desastres fitosanitarios severos son diez, y están relacionadas con dos ambientes básicos: el desierto y las selvas bajas (Cuadro 2). Las más violentas son las denominadas *migrantis*, que es la especie del África septentrional (se concentra en la cuenca del Senegal) y se desarrolla en zonas de contacto entre los biomas de desiertos y sabanas. De hecho, la sabana misma es una zona de transición que separa la selva tropical de las regiones áridas y de los desiertos. Le sigue en orden de importancia la subespecie sudamericana o *cancellata* que se localiza en las estepas de Argentina (Pampas), Chile, Uruguay y Paraguay, y las praderas subtropicales del sur de Brasil. Prácticamente abarca la cuenca del Río de la Plata. Las estepas son de origen antrópico y ocupan el lugar de antiguos ambientes forestales (Zunino y Zullini, 2005). Sin embargo, la langosta centroamericana, de la especie *piceifrons,* es un insecto de selvas bajas (caducifolias), de hecho se desarrolla muy bien en plantaciones tropicales y pastizales. Su área de influencia va de la parte norte de Perú, Ecuador, Colombia, Venezuela, abarca la mayor parte de Centroamérica y se asienta en las selvas bajas mexicanas desde Yucatán alcanzando la parte boreal de éstas que son los límites de la región Huasteca Tamaulipeca, Potosina y Veracruzana (Figura 1).

La última aparición de la plaga de langosta centroamericana en el ámbito regional fue entre 2000 y 2004 y causó un desastre fitosanitario en Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, Guatemala y México (SENASICA, 2005; OIRSA, 2005; RETANA, 2003). El Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA) entró en Centroamérica para controlar la plaga y resarcir los daños provocados a la agricultura, sobre todo hacia productores ganaderos y azucareros. En el caso mexicano no se presentaron ayudas internacionales de ningún tipo, a pe-

Cuadro 1. Clasificación taxonómica (de acuerdo con Barrientos *et al.*, 1992)

Clasificación taxonómica							
(De acuerdo con Barrientos *et al*. 1992)							
Phyllum:	Arthropoda						
	Superclase:	Hexapoda					
		Clase:	Insecta				
			Subclase:	Pterygota			
				Orden:	Orthoptera		
					Suborden:	Caelifera	
						Superfamilia:	Acridoidea

Cuadro 2. Plagas de langosta según especie y región

Especie	Región	Generaciones por año
Langosta del desierto	Europa, Cercano Oriente, Asia	3-4
Langosta roja	África austral	1
Langosta migratoria	África, Europa, Asia	hasta 6
Langosta marrón	África austral	hasta 3
Langosta sudamericana	América del Sur	2
Langosta centroamericana	América central	2
Langosta marroquí	África, Europa y Asia	1
Langosta italiana	Europa, Cercano Oriente, Asia	1
Saltamontes senegalés	África, Cercano Oriente, Asia	1-3
Langosta	Australia	1

Fuentes: Centre for Overseas Pest Research (1992), The locust and grasshopper agricultural manual, Londres y FAO (EMPRESS), en Los efectos económicos de las plagas y enfermedades transfronterizas de los animales y las plantas, FAO (2001), p. 212.

sar de que nuestro país ha ratificado convenios con OIRSA desde el 2000 (SENASICA, 2005). La langosta centroamericana (*Shistocerca piceifrons piceifrons Walker*) presenta tres fases de desarrollo: huevo, ninfa e imago o adulto (Garza, 2005a; Barrientos *et al.,* 1992). El imago es un volador joven cuyos órganos sexuales son inmaduros; un adulto es un imago cuyos órganos reproductores son funcionales y ambos son alados. Las características fásicas se presentan a continuación.

Huevo. Los huevecillos son de forma alargada, de color crema o amarillo claro, son depositados dentro del suelo envueltos en una capa de materia espumosa que constituye una vía natural de salida a las ninfas recién nacidas. Son depositadas en masas conocidas como *ootecas* Cada huevecillo mide de 8 a 10 mm de longitud y de 1 a 2 mm de ancho (Figura 2).

Ninfa. Las langostas jóvenes son conocidas como *saltones o ninfas*, éstas presentan entre 5 a 6 estadios ninfales; a cada etapa de desarrollo ninfal se le conoce como instar y va de los 6 a los 45 mm. En cada momento instar se desarrollan el tórax, las alas, las patas y las antenas. La coloración de los saltones varía de verde claro en su fase solitaria, amarillo en las fases intermedias (*Transiens congregans* y *Transiens disocians*) y anaranjado rojizo en su fase gregaria.

Imago o adulto. Los adultos de la langosta presentan dimorfismo sexual, el macho mide de 39 a 42 mm de longitud y la hembra de 48 a 55 mm, el color cambia gradualmente de una café rojizo en el caso de los *imagos* a una coloración

Figura 1. Distribución de la langosta centroamericana y sudamericana.

café amarillenta en los adultos que han alcanzado la madurez sexual. La *Shistocerca piceifrons piceifrons Walker*, cuando se comporta como bandas presenta dos generaciones por año, la temporada seca entre diciembre a mayo la pasan como *imagos*, es decir, como adultos que no maduran sexualmente; al inicio de las lluvias, la cual ocurre generalmente entre mayo y junio, se inicia la madurez sexual, la copula y la oviposición. Las hembras ponen de 2 a 3 *ootecas* con 80 a 120 huevecillos en cada una, que entierran a una profundidad de 6 a 10 cm dentro del suelo, éstas eclosionan en un periodo de 15 a 20 días para dar lugar a las ninfas de primera generación (junio-julio), las cuales presentan de 5 a 6 mudas. Los adultos de la primera generación maduran sexualmente en un periodo de 25 a 35 días. Estos adultos ovipositan durante septiembre y octubre y dan origen a las ninfas de la segunda generación durante los meses de septiembre a diciembre, hasta mudar al adulto sexualmente inmaduro conocido como *imago*, el cual requiere

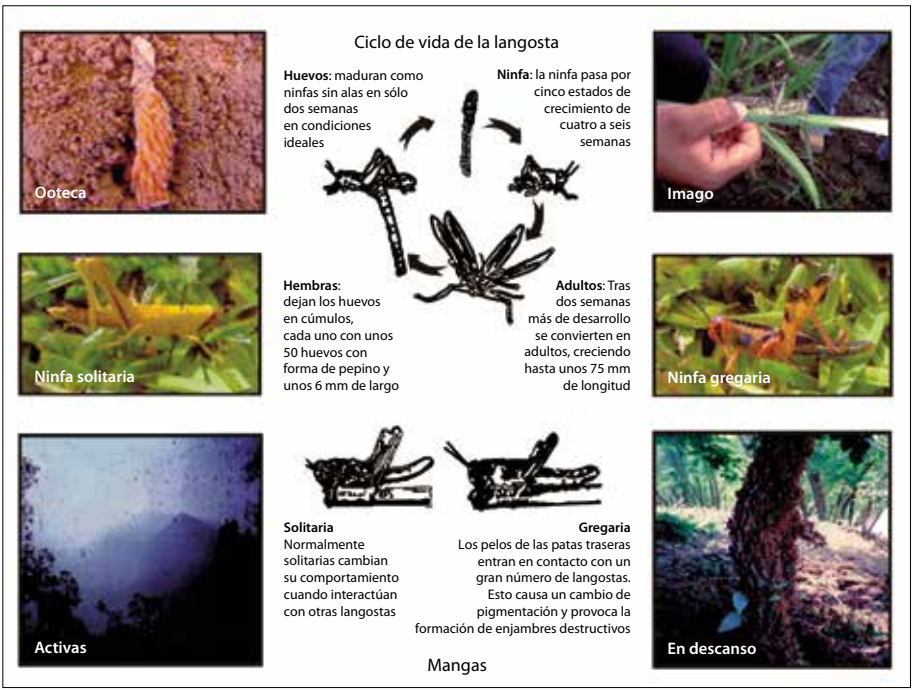


Figura 2. Ciclo de vida de la langosta centroamericana.

de cinco a seis meses para alcanzar su madurez sexual, lo cual ocurre al inicio de las lluvias del siguiente ciclo pluvial.

Cuando la langosta centroamericana gargariza con temperaturas promedio mayores a los 27° C y una precipitación pluvial promedio menor a los 1 000 mm anuales (Garza, 2005a), produce mangas de más de 5 km, se presenta la metamorfosis desde el estado ninfal (rojo) hasta el adulto que es de color negro y rojo, esto es para captar mayor energía solar y elevar su propia temperatura. Se alimenta las 24 horas del día, consumiendo hasta cinco veces su peso (Tinoco, 2001; Barrientos, 1998; Garza, 2005a). Asimismo, las condiciones agroecológicas propicias para que se desarrolle el insecto (*termotropismo* y *fototropismo* positivo de la especie) son planicies de suelos suaves arcillosos-arenosos, extensos campos de cultivo y pastizales, un sistema hídrico caudaloso y permanente, así como un régimen lluvioso no tan intenso, pero sobre todo elevadas temperaturas y brillo solar intenso (Retana, 2003).

Los sistemas-producto en los que la plaga provoca un desastre fitosanitario (devastación de los cultivos, pérdida de patrimonio y aplicación de pesticidas) son

estratégicos tanto para el mercado comercial como para los sistemas de subsistencia. Entre los más importantes están maíz, soya, frijol, ajonjolí, sorgo, cacahuate, algodón, henequén, caña de azúcar, plátano, diferentes frutales (naranja, papaya, coco, limón, lima, mandarina) y arroz. Pastos como guinea, pangola, bermuda y estrella, así como diversas plantas y arbustos silvestres como palma africana, mezquites, huizaches, guázima, choveno, guamúchil y tronadora (Garza, 2005a; SENASICA, 2005).

La plaga de langosta centroamericana afecta a ocho estados que presentan condiciones gragarigenas: Yucatán, Veracruz, Oaxaca, Chiapas, San Luis Potosí, Tamaulipas, Veracruz y Tabasco. El Servicio Nacional de Sanidad e Inocuidad Alimentario (SENASICA) tiene desplegadas campañas fitosanitarias que trabajan en diez estados del país con acciones de exploración, muestreo y control (biológico y químico). Las campañas contra la langosta centroamericana datan desde inicios del siglo pasado en nuestro país, pero no es sino hasta el 17 de julio de 1998 a través de la Norma Oficial Mexicana (NOM-049-FITO-1995) que se reorganizan y reciben financiamiento y apoyo técnico oficial de SENASICA, oficina directa de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en México.

El caso de la Huasteca Potosina

Dentro de la realidad potosina, la región Huasteca es una de las regiones que presenta los mayores índices de marginación económica y social, la que cuenta con mayor población (30% del total estatal) y donde se concentra el 52% de la población económicamente activa en el sector primario. Esta región se ubica hacia la parte oriental del estado, entre los 19° 51′ y 21° 34′ latitud N y 15° 54′ y 116° 56′ longitud W, en la región de barlovento de la Sierra Madre Oriental. Abarca dos regiones fisiográficas: la planicie costera del Golfo de México hacia la parte noreste y estribaciones de sierra hacia la parte noroeste, media y suroeste (Figura 3). Se define por ser el límite boreal de las selvas mexicanas según Rzedowski (1986). Se caracteriza por presentar la línea divisoria entre aridoamérica y mesoamérica, lo que lo define como una zona de contacto con endemismos biogeográficos. En cuanto a los aspectos hídricos (que junto con el relieve dan formas fisiográficas únicas), la conforman dos subcuencas: la del río Valles hacia la planicie norte (que se desborda en el río Tampaón) y la del río Moctezuma, ambos caudales permanentes que pertenecen a la parte baja de la cuenca del Pánuco. La región abarca una superficie de 1 121 866.06 ha. Todas esas características físicas han

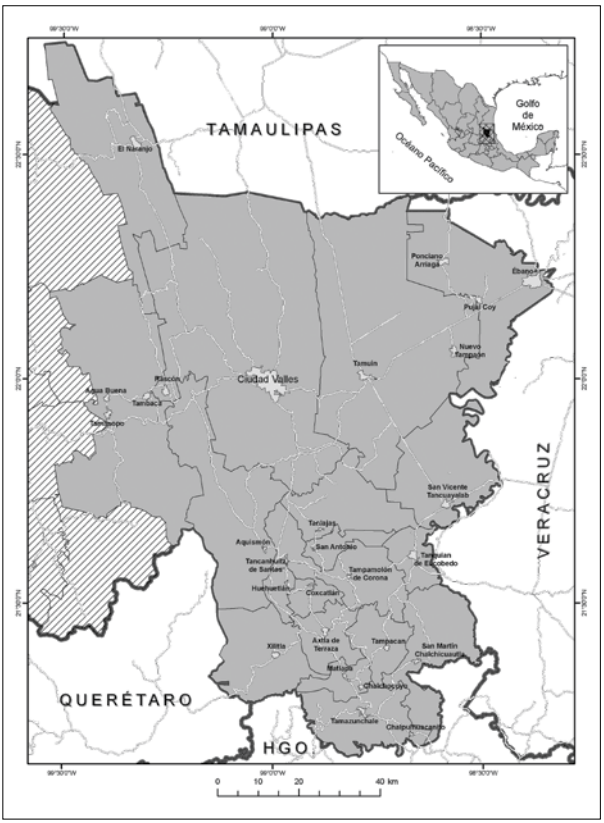


Figura 3. Ubicación de la región Huasteca Potosina.

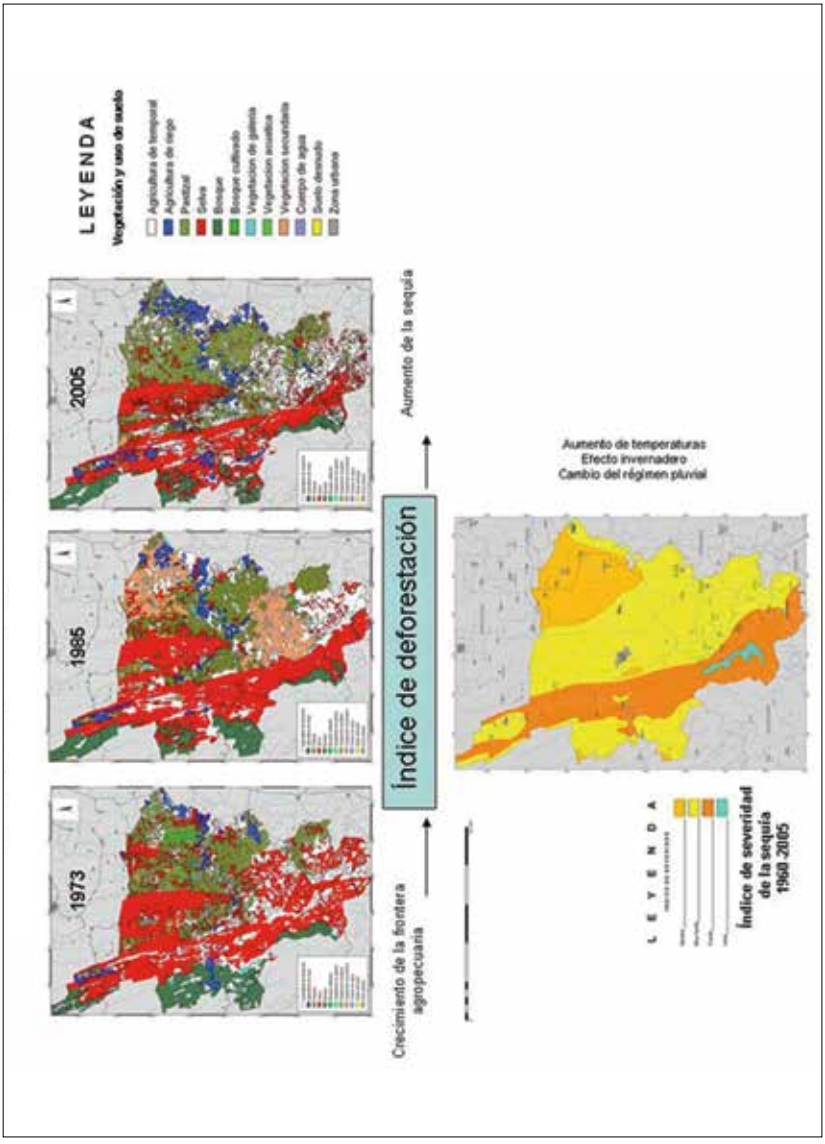
permitido el desarrollo de actividades agropecuarias preponderantes, sobre todo de caña de azúcar que abarca el 40% de la superficie (agropecuaria) de la región y que se introduce a partir del 1970 de manera agroindustrial, le sigue en orden de importancia los pastizales cultivados que abarcan el 28% del área y en tercer lugar los cítricos que comprenden el 22%. El café es una actividad importante hacia la zona indígena ubicada en la parte serrana al sur de la región y que engloba el 9% de la superficie. Así las actividades agropecuarias abarcan el 60% de la superficie de la Huasteca Potosina, dejando sólo el 31% a biomas de selva (entre altas, medias y la predominante caducifolia) y 8% de bosques mesófilos y de confieras y el 1% de vegetación secundaria (Galindo y Olvera, 2005).

Esta artificialización del espacio hacia actividades agropecuarias fue en contra de las selvas y bosques de la región. La deforestación en la región Huasteca Potosina en los últimos 30 años (1973-2000) fue del 48.66%, se devastaron 117 399 ha

de selvas y 24 930 de bosques. La parte de mayor impacto ambiental se da hacia la parte noreste de la región abarcando los municipios de Ciudad Valles, Tamuín, Ébano y San Vicente Tancualayab (Figura 4). Esta es la zona conocida como el Pujal-Coy en donde según Aguilar (1995), a partir de 1978 se llevó a cabo uno de los peores fracasos de planificación agropecuaria que transformó las praderas naturales y la selva baja caducifolia en zonas de hortalizas y con el tiempo de forrajes y pastizales (introducción de pastos africanos sobre todo). Es precisamente en esta zona donde se han localizado desde 1960 las zonas de *ovipostura* y *gregarización* de langosta centroamericana y que se ha intensificado a medida que avanzó el proceso de deforestación (Galindo, 2006).

Conforme se fue arrasando con la vegetación primaria, la implicación directa fue sobre el clima, ya que al parecer es una zona donde se ha elevado la temperatura en un grado y han desminuido las precipitaciones de 900 a 600 mm en promedio (Contreras *et al.*, 2006). Según Hernández (2006), el índice de severidad a la sequía se da hacia los rangos de severos a muy fuertes en la misma región (severo de -0.5 a -0.6 y muy fuerte de -0.4 a -0.5). Este índice se basa en los meses donde se registró un déficit en la precipitación esperada. Se obtiene, comparando la sumatoria de los meses de un año que han sido menores a la media de precitación para dicho mes y la sumatoria de las precipitaciones mensuales medias que han sido mayores a las precipitaciones mensuales del año estudiado. Así, para activar la gregarización y la formación de mangas se necesitan altas temperaturas (en la región sobrepasan los 38° C promedio) y que sólo se dan en cada etapa donde se presenta el fenómeno de "El Niño" (ENOS u oscilación del sur), por eso la aparición de la plaga resulta periódica y no dentro de los parámetros de normalidad de canícula o de época de secas (Retana, 2003, Contreras *et al.*, 2006). Esto nos lleva a plantear que el combate, control y monitoreo de la plaga no debe analizarse sólo tomando en cuenta la entomología del insecto (para saber en que estadio de la metamorfosis poder atacarlo, ya sea de forma biológica o química) o las características ecológicas del lugar, sino incluir dentro del modelo la meso-escala tanto meteorológica como climatológica.

La Campaña contra la langosta en San Luis Potosí, fue una de las primeras en proponer nuevos métodos técnicos para el combate y control de la plaga (monitoreo georreferenciado con apoyo GPS de los diferentes estadios del taxón y el manejo de SIG). Sin embargo, el combate a la plaga de langosta centroamericana en la región enfrenta una problemática fuerte: *a)* no existe el manejo integrado en ninguna de las campañas fitosanitarias para atacar esta plaga, *b)* se desconocen las causas que provocan los brotes y mangas, y k que por lo violento de la infestación y en las etapas donde causa más estragos, sólo se puede combatir con la



Fuente: cartografía y base de datos del proyecto SAGARPA-CONACYT 2004-CO1186/A1

Figura 4. Variación de la vegetación y el uso de suelo (1973-2005) y su relación con la sequía (1960-2005) en la Huasteca Potosina.

utilización de pesticidas organofosfórados y fenilpirazoles como son el *malathion 1000*, *fipronil*, y en la región Huasteca Potosina se llegó a utilizar en la temporada más dura de la plaga *parathion metílico*. El combate biológico llega ya hacia las etapas de declinación y *diapausa* (estado de latencia sin formar mangas) del taxón, en donde se ha utilizado el hongo *Metarhizium anisopliae* variedad *acridum* en aceite citrolina y aceite crudo de soya (CESAVESLP, 1999-2004).

En la Huasteca Potosina, la plaga de langosta centroamericana se torna en desastre entre el 2000 y el 2003 (CESAVESLP, 2005). La inversión financiera para su combate ascendió a 26.6 millones de pesos, 7% más de lo que recibe la región en inversión pública para el desarrollo del sector agropecuario (CESALVSLP, 1999-2004; INEGI, 1999-2004). El combate de la plaga lo financiaron la SAGARPA federal (33%), el gobierno estatal (34%) y los productores (33%). Es necesario evidenciar la importancia al combate de los desastres fitosanitarios, ya que si bien es cierto no hay exposición a pérdida de vidas humanas, sí hay una pérdida del patrimonio de los productores y afectaciones físicas en salud. Cabe mencionar que ninguno de estos productores cuenta con seguros sobre siniestros fitosanitarios (de hecho de ningún tipo) y enfrenta una de las peores crisis en el sector: el desplazamiento del mercado nacional por el embate y competencia desleal con productos importados y la exclusión del mercado regional ante el TLCAN. Los cultivos con mayor problemática son precisamente los de mayor incidencia económica en la Huasteca Potosina: caña de azúcar, cárnicos y frutales (Galindo, 2006).

Para los productores de caña de azúcar en México, 2001 fue un año crítico, se violentó el sector porque los propietarios de los ingenios no les pagaron a los cañeros (ni a la CNA ni a la CFE) y se declararon en septiembre de ese año en quiebra. La solución fue la nacionalización de los ingenios por parte del Estado mexicano quien de hecho financió buena parte del combate a la plaga de langosta centroamericana, si no la crisis social hubiera tenido consecuencias mayores. De aquí la necesidad de la construcción del mapa de riesgo a esta plaga, ya que las condiciones de vulnerabilidad que se van gestando pueden ir acumulándose progresivamente llegando a configurar una situación de desastre mucho mayor que en el periodo anterior y en el entendido de que los fenómenos naturales de extraordinaria ocurrencia pueden ser previsibles, todo depende del grado de conocimiento que se tengan acerca del funcionamiento del espacio.

La propuesta teórico-metodológica

Los antecedentes sobre entomología aplicada y utilización de los SIG y la teledetección se pueden clasificar de tres formas: *a) Donde sólo hace uso del SIG*. En los primeros estudios el uso de SIG está vinculado a determinar las relaciones entre explosiones poblacionales de insectos *outbreaks* y las variables ambientales como son el clima, suelo, tipo de cultivo, uso de la tierra, tipo de vegetación (Kemp *et al.*, 1996; Cigliano *et al.,* 1995; Cigliano-Torrusio, 2003; Johnson, 1989). *b) Dónde sólo se usan las imágenes de satélite*. En estos estudios se ha empleado el índice de vegetación normalizado (NDVI, índice que evalúa diferentes niveles de "verdor" de la vegetación) a partir de las imágenes LANDSAT, NOAA y MODIS para determinar áreas en las cuales las condiciones son propicias para la ovipostura asociado con la distribución de las precipitaciones (Bryceson, 1989; Voss y Dreiser, 1997; Magor y Pender, 1997; Cressman, 1997; FAO, 1988) y *c) Dónde se aplican ambas técnicas (SIG e imágenes de satélite)*. Aquí se han desarrollado sistemas de alerta fitosanitaria donde se definen aquellas zonas propicias para el establecimiento de la langosta, y donde es utilizada para prevenir posibles ataques de esta plaga, apoyados en la identificación de biotopos (Hielkemay Snijders, 1993; Miranda *et al.*, 1996; Lecoq *et al.*, 1997; Lecoq, 2000; Hunter y Deveson, 2002; Hunter, 2004). Sin embargo, son muy pocos los estudios realizados con visión espacial integral u holística, es la correlación tanto de variables ecológicas, entomológicas y socioeconómicas. Tampoco se correlacionan los brotes de las plagas de langostas con el grado de impacto que ha sufrido ese espacio.

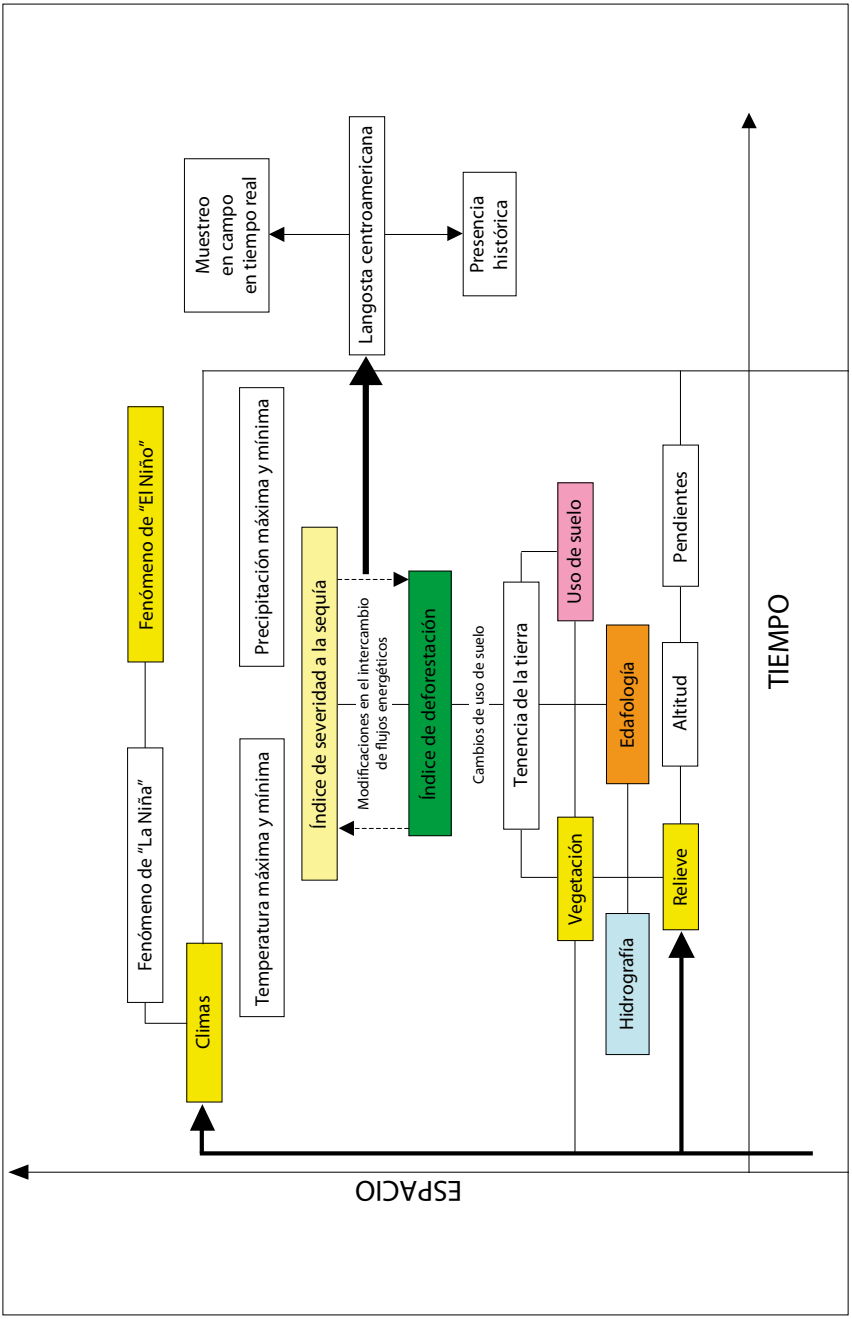
En este orden de ideas, el enfoque sistemático-descriptivo de la biogeografía regional suele reconocer una serie de categorías (regiones, provincias, etc.) y organizarlas en un esquema jerárquico, intentando así clasificar no sólo el área de emplazamiento, sino también a sus respectivos ocupantes, sean ellos especies, taxones superiores u otros grupos. El enfoque de la biogeografía tiene por objeto interpretar los factores que influyen en la distribución geográfica de los seres vivos. A su vez, este tipo de problemática puede enfocarse desde dos perspectivas, la ecológica y la histórica. La perspectiva ecológica o sincrónica se basa en la comparación entre las áreas de distribución y los parámetros abióticos (configuración geográfica, climática, etc.) y bióticos (composición y estructura de las comunidades) que intervienen en el territorio considerado. La perspectiva histórica o diacrónica se propone reconstruir los acontecimientos de las distribuciones de esos seres vivos en términos de causas remotas, por medio de la comparación entre las áreas de distribución actuales. Sin embargo, aun cuando la presencia de la plaga en sí está condicionada por zonas agropecuarias, esas zonas presentan un nivel

de impacto severo (deforestación y/o sequía) que propicia la reproducción del insecto. Esto se logra medir con una reconstrucción histórica con bases de datos georreferenciados, con el muestreo especializado, ya sea por los técnicos de campo que pertenecen a la campaña fitosanitaria de langosta o por el conocimiento de los propios productores (empleo de archivos históricos oficiales, hemerográficos, muestreos con GPS por estadio, etc.), con apoyo de la cartografía temática (uso de suelo, índice de deforestación, índice de sequía, tenencia de la tierra, climas y edafología), análisis espectral multitemporal (LANDSAT MSS y ETM+) e información climática dentro de la microescala (estaciones climáticas) y la mesoescala (ENOS o fenómeno de "EL Niño" por intensidad), ya que al haber mayor impacto en la región, la dispersión de las zonas de reproducción y gregarígenas se amplía y los procesos de humedad y temperatura se modifican llegando a ser muy extremos, sobre todo si se presenta el fenómeno de "El Niño" (Contreras *et al*., 2006; Galindo, 2006; Retana, 2003).

Una vez definidos estos primeros parámetros, se pueden correlacionar en el espacio el resto de las variables ecológicas citadas en la literatura (temperaturas y precipitaciones máximas y mínimas, altitud, pendientes, hidrología, dirección de los vientos; Cuadro 3). La langosta centroamericana, es una evidencia de impacto ambiental, de desequilibrio ecológico, resultado de una planeación y artificialización irracional del espacio. Para demostrar lo anterior se emplearán métodos de integración, multivariados, esto es desde la perspectiva socioeconómica como física. Así, se podrán definir las causas que provocan la plaga a partir de dos enfoques: el de la ecobiogeografía sistémica (caracterización del taxón; Zunino y Zullini, 2005; Espinosa y Llorente, 1993), el análisis espacial que incluye la dimensión temporal y multivariada, apoyados en los SIG y la PR, ambas dentro de los métodos cuantitativos-estructuralistas.

Para llevar a cabo los procesos de construcción de cartografía temática, análisis y correlación espacial se utilizaron imágenes de satélite LANDSAT MSS (1973 y 1985) y ETM+ (2000 y 2005) para la cartografía de uso de suelo, el inventario agropecuario (por tipo de cultivo) y el índice de deforestación. También se trabajó el NDVI y las bandas infrarrojas de LANDSAT MSS y ETM+ para la delimitación del área de emplazamiento y reproducción. Se utilizó información vectorial georreferenciada del INEGI (2000; curvas de nivel, hidrológica, edafología y toponimia) que permitió la creación del modelo digital de terreno, el mapa altitudinal y el de pendientes. Los mapas climatológicos (elaborados por Hernández, 2006 y 2006a; climas, índice de severidad a la sequía, temperaturas máximas y mínimas) se trabajaron con 95 estaciones meteorológicas con datos de 1960 al 2004, con bases de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN;

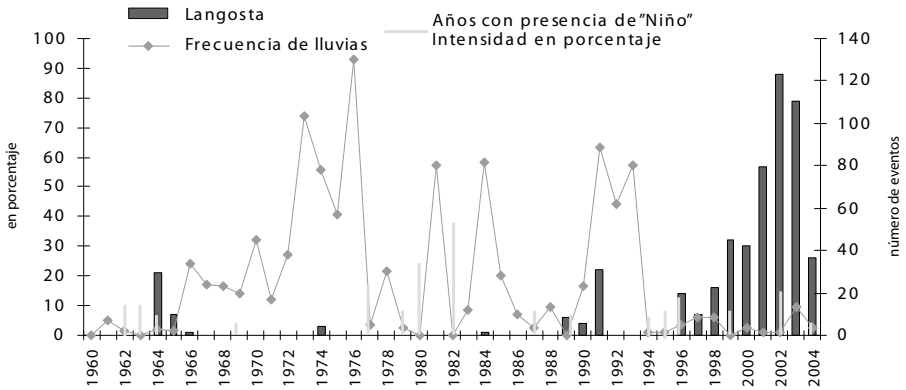
Cuadro 3. Modelo de simulación del riesgo al ataque de langosta centroamericana



ERIC II y CNA delegación SLP; 70 caen dentro de la región Huasteca y 20 fuera de la misma). Se contó con una base de datos de los años de presencia del fenómeno de "El Niño" y su intensidad (de bases de datos de Amador, 1998; Treberth, 1997; Centro de Predicción Climática de los Estados Unidos, NOAA, 1989-2002; citados en Contreras *et al*., 2006). El muestreo histórico de la presencia de langosta centroamericana en la región, se georreferenció con base en fuentes primarias y secundarias (*Diario Oficial de la Federación*, Gaceta Oficial del estado de San Luis Potosí, periódicos de circulación nacional, estatal y regional) según el método historiográfico (Florescano y Swan, 1995). El resultado es una base de datos de 1960 al 2004, con la que se sacó la información cuantitativa de sitios afectados por la plaga. El muestreo especializado en campo se obtuvo del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de San Luis Potosí de la Campaña contra Langosta. Se georreferenciaron de manera constante más de 800 000 ha con GPS (de 1999 al 2005) por estadio: ovispostura, gregarización e invasión. Además se cuenta con una base de 400 puntos de control en campo que incluye tipo de cultivo, tipo de vegetación zonas de muestreo de plagas, plaguicidas utilizados y los costos. El software de trabajo fue ILWIS 3.3.

La reconstrucción histórica y el muestreo en campo

Tras la búsqueda histórica se encontró no sólo la ubicación geográfica del ataque de mangas, sino la frecuencia con la que se presenta, que correlacionado con la información histórica de las variables físicas dio un primer "esquema empírico" que explica la presencia del insecto (Texeira y Monné, 2005; Figura 5; Cuadros 4 y 5). Los primeros ataques de manga se dan hacia la primera mitad de los años sesenta, pero a partir de 1994 los ciclos se vuelven permanentes y cuatro años después el crecimiento es exponencial, llegando a la cifra histórica de combate a la plaga que duró 48 meses. De tener 228 ha con problemas al inicio del decenio de los años noventa, se dispara a 12 200 ha dañadas hacia la primera parte del 2000. También se evidencia un patrón de correlación importante, ya que al parecer la langosta se presenta después de dos o tres años de sequía severa y en cuanto caen las primeras lluvias (que en realidad es una precipitación mínima de 800 a 900 mm) se forma la primera generación de mangas. Este fenómeno parece ser que está muy correlacionado con el "Niño". Según Contreras y colaboradores (2006) y Galindo (2006) la temperatura media aumenta en años "Niño" entre un 1.5° C hasta 4° C en la planicie aluvial del río Tampaón, en donde incluso la temperatura máxima aumenta de un promedio de 31.8° a un promedio de 38.3° (2002) y 37.7° (2003); y con índice de severidad a la sequía severa), condición que al parecer, garantiza la reproducción del acridido.



Fuente: Base de datos del proyecto SAGARPA-CONACYT (2004-CO1-186/A-1).

Figura 5. Presencia histórica de la langosta centroamericana asociada a la frecuencia de las lluvias y al fenómeno de "El Niño", 1960-2004.

En todo análisis biogeográfico, el *área de distribución* y más precisamente el *área de distribución específica*, el espacio geográfico deja de ser el soporte físico de la biosfera y se convierte en la condición fundamental de desarrollo. Si la especie es lo que confiere realidad al "área de distribución", al espacio que ocupa (en virtud de las interacciones que entre ambas entidades se establecen, como partes de un sistema integrado), entonces el área de distribución y su ocupante comparten un destino común. El área de distribución, al igual que la especie, tiene propiedades ontológicas: nace (con el nacimiento del ocupante), se modifica a través del tiempo y si desaparecen algunas de las variables o categorías del espacio, o bien evoluciona la especie o ésta queda latente o, en casos extremos, desaparece. Por esto resulta fundamental delimitar el área de distribución y de emplazamiento para poder hacer la correlación con el resto de las variables espaciales que propician no sólo su presencia, sino el desarrollo de cada etapa fenológica. Pero además la *nube de puntos* que nos muestra en la fase de ovispostura (apoyados en el muestreo de CESAVESLP (1998-2004) y en la ubicación de los ríos permanentes e intermitentes), demuestra que los años de "Niño moderado" (que presentó una duración de nueve meses (de marzo de 2002 a marzo de 2003; Contreras *et al*., 2006; Retana, 2003) es cuando se acrecentó este fenómeno de reproducción; cerca de los ríos permanentes como es la cuenca del río Valles y del Tampaón (Figura 6).

Cuadro 4. Años con precipitación por debajo del promedio y su relación con el fenómeno de "El Niño"

Año	Promedio de precipitación (mm)	% de precipitación por debajo del promedio	Observaciones
1962	1 123.16	25	
1963	1 125.74	25	Se relaciona con "El Niño" de junio de 1963 a febrero de 1964, mismo que tiene una duración de nueve meses.
1964	1 215.17	19	
1969	1 397.54	6	Se relaciona con "El Niño" de noviembre de 1968 a diciembre 1969, mismo que tiene una duración de catorce meses.
1977	1 049.52	30	Se relaciona con "El Niño" de julio de 1977 a enero de 1978, mismo que tiene una duración de siete meses.
1979	1 181.54	21	Se relaciona con "El Niño" de octubre de 1979 a abril de 1980, mismo que tiene una duración de siete meses.
1980	1 032.28	31	
1982	909.52	39	Se relaciona con "El Niño" de abril de 1982 a julio de 1983, mismo que tiene una duración de dieciséis meses.
1987	1 182.77	21	Se relaciona con "El Niño" de agosto de 1986 a febrero de 1988, mismo que tiene una duración de diecinueve meses.
1989	1 242.11	17	
1994	1 245.26	17	Se relaciona con "El Niño" de junio de 1994 a marzo de 1995, mismo que tiene una duración de diez meses.
1995	1 219.58	18	
1996	1 116.36	25	
1997	1 130.83	24	Se relaciona con "El Niño"de abril de 1997 a abril de 1998, mismo que tiene una duración de trece meses.
1999	1 284.10	14	

Continuación

2000	1 179.00	21	
2001	1 217.64	19	
2002	1 167.69	22	Se relaciona con "El Niño" de mayo de 2002 a marzo de 2003, mismo que tiene una duración de nueve meses.
2004	1 259.51	16	
Promedio de precipitación del periodo = 1 494.45 mm			

Elaboró: Carlos Contreras a partir de promedios anuales de 92 estaciones meteorológicas.

Cuadro 5. Registro histórico de la plaga de langosta centroamericana en la Huasteca Potosina y zonas de ataque 1960-2004

Año	Área geográfica	Acontecimiento	Fuente
1963 febrero a mediados	Sur de Mante y norte de Tamuín, pasó para el rumbo del Salto	Cayó una plaga o manga de langosta. Niño.	3
1964 julio 11	Ejidos Álvaro Obregón (Pujal), El Cuiche y Nuevo Tambolón, del municipio de Tamuín y en El Naranjo del municipio de Valles con otros brotes en Santa Elena del municipio de Tamuín y en El Naranjo	Se anunció que había reaparecido la langosta en la Huasteca.	3
1964 mayo-octubre	Villa Guerrero, Tamuín, Ciudad Valles, Álvaro Obregón, El Cuiche, Santa Elena, Ébano, San Vicente Tancuayalab, Santa Clara, Casas Blancas, El Tulillo, Tamasopo, Tampamolón, Tanquián, Tamazunchale.	La plaga de langosta ataca los cultivos de maíz y caña y amenaza todos los sembradíos. Entran en controversia el gobierno y los campesinos, la SAG no ataca la plaga correctamente, intervención del gobierno tanto estatal como Federal. Niño.	4
1965 junio-septiembre	El Naranjo, Ciudad Valles y Tamuín, Ciudad del Maíz, Tamasopo,	Cosechas afectadas por la plaga de langosta. La plaga invade en cuestión de minutos gran cantidad de sembradíos, por lo que no es posible su rápido control.	4

Continuación

1989 junio-septiembre	Tamuín, San Vicente y Tanquián	La sequía ha durado ya nueve meses y los ganaderos han pedido la colaboración del Gobierno del Estado y de la SARH para la implementación de un programa para la erradicación de la plaga de langosta.	4
1991 abril-junio	Ejidos Tamalacaco, Alfredo V. Bonfil y Aurelio Manrique, Tamuín, Ébano, San Vicente Tancuayalab, Tanquián, Tampamolón y Tampacan	Alrededor de tres mil hectáreas de pastizal han sido afectadas, por la plaga de langosta. La humedad provocada por las pocas lluvias y posteriormente el calor y las altas temperaturas fueron la causa del brote generalizado de esta plaga.	4
1997 mayo-octubre	Ébano en sus poblados de Ponciano Arriaga, el de Aurelio Manríquez, el Cerro de la Concepción, Niños Héroes, San Pedro de las Anonas, Jalpilla y Tamuín	Esta plaga ha arrasado con grandes superficies de pastos y de cultivos de maíz. Los campesinos están buscando apoyos productivos de las dependencias involucradas para los más afectados. El Gobierno del estado y la SAGAR pusieron a disposición de las Juntas Locales de Sanidad Vegetal 460 litros de insecticida. Niño.	4
1998 julio	Tampamolón, Tanquián, San Vicente	La humedad de la tierra a causa de las escasas lluvias y el calor ha favorecido para que estas plagas hayan brotado y amenacen con la destrucción de los pastos y la agricultura Sólo en la comunidad de Ponciano Arriaga hay 2 200 ha, aproximadamente, que se encuentran infestadas por la langosta. Niño.	4
1999 junio-octubre	Tanlajás, Axila, Tamuín, Ébano y San Vicente.	Los pastos están siendo afectados por la plaga de langosta debido a las condiciones climatológicas de la región. Los productores señalaron que el clima imperante facilitó enormemente la reproducción de la plaga, ya que no se tuvo lluvia constante y abundante que lograra terminar con los insectos. La presencia de las lluvias no logró disminuir la población de la plaga, por el contrario, sirvió para su aumento.	4

Continuación

2001 mayo-octubre	San Vicente, Ébano, Taquín Ciudad Valles Ponciano Arriaga Santa Elena y Nuevo Ahuacatitla	Las condiciones climatológicas que se han registrado en la zona han favorecido la presencia de la plaga de langosta. Las lluvias no se han presentado lo que ha provocado que estas plagas se presenten en por lo menos 40 mil ha. La comunidad de Ponciano Arriaga ha solicitado la intervención de las autoridades para combatirla y evitar que el desastre continúe. Niño.	4
2002 junio-octubre	Tamuín, Ébano, San Vicente, Tanlajás, Tanquián, Ciudad Valles, Aquismón Tancanhuitz, Tampamolón, San Martín, Tampacán, Tanquián	Ganaderos denuncian situación agravada por invasiones prediales, plagas de langosta y sequías. El 90% de los cultivos en la Huasteca se han perdido y los municipios afectados sólo han encontrado desolación y tristeza. La SEDRAH estima que 19 mil ha están infestadas con langosta. Sanidad Vegetal dice que hay 19 mil ha infestadas de chapulín y langosta en Tamuín. Niño.	4
2003 agosto-octubre	Ébano, Tamuín, San Vicente y El Naranjo	Los tres primeros municipios se encontraban infestados por la plaga de langosta, afectando cerca de 14 mil ha, hubo infestación en diferente puntos, principalmente en la zona Taquín.	4
2004 mayo		Una plaga de langosta desde el lunes 10 de mayo empezó a desplazarse sigilosamente con miles de minúsculos insectos hacia los cañaverales del Naranjo.	4

Fuente: Base de datos del registro histórico del proyecto SAGARPA-CONACYT (2004/CO1-186). "Propuesta de una metodología para identificar zonas vulnerables a la sequía y a las plagas que afectan a las actividades agropecuarias en la Huasteca Potosina, apoyada en imágenes de satélite, sistemas de información geográfica, análisis multivariado y un modelo de simulación climática".

1. AGN (1774), Indiferente Virreinal. Caja 5027, Intendencias 5027 – 068, Fojas 4.
2. La Unión Democrática II, núm. 149,4 de septiembre de 1878; tX, núm.709, 12 de junio de 1885.
3. Meade, J. (1970), Historia de Valles.
4. Periódicos locales de San Luis Potosí: *El Sol de San Luis*, *El Heraldo*, *El Momento*, *El Mañana de Valles* (1960-2005).

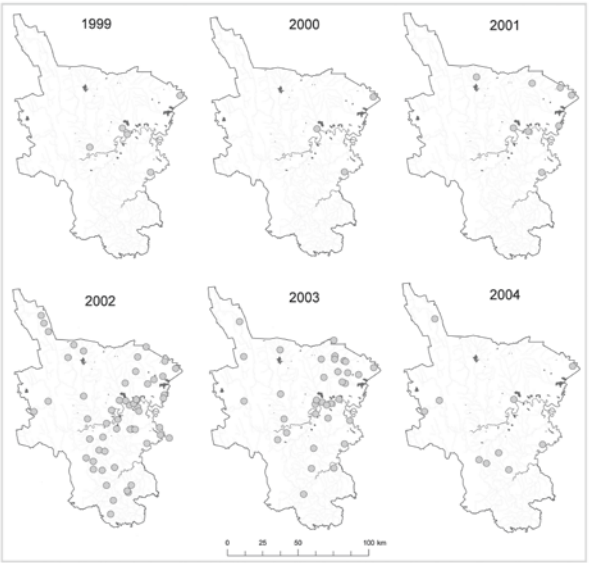


Figura 6. Muestro de la distribución de zonas de ovipostura de langosta centroamericana en la Huasteca Potosina por año. Método de "nube de puntos".

Análisis espectral

Para determinar el área de emplazamiento (las mejores condiciones ecológicas para la reproducción), el primer paso es trabajar sobre longitudes de onda de 0.7 a 1.4 micras (banda 3 y 4 de LANSDAT ETM+), que combinado con la "nube de puntos" de distribución histórica de la especie y muestreo de etapa fenológica apoyados con GPS, no sólo evidencian el trazado de la isolínea de distribución, sino los niveles de temperatura y humedad requerida por el taxón (Figura 7). Al hacer la sobreposición en las imágenes de satélite LANDSAT (MSS y ETM+) tanto en infrarrojo como en el NDVI y el mapa de uso de suelo, tantos los puntos históricos hemerográficos como los del muestro de sanidad vegetal también mostraron una correspondencia del 90% (Figura 8) sobre todo hacia la parte intermedia del río Tampaón (donde se puede afirmar ha sido el punto de desarrollo del taxón por varios decenios) ha aumentado su presencia porque la vegetación primaria ha sido sustituida por completo hacia actividades agrícolas (plantíos de soya, sorgo, maíz forrajero, cítricos, caña de azúcar y pastizales), dando un área bien delimitada de influencia que se determina por abundancia de la especie. En este caso, la diferencia espectral entre las zonas de ovipostura y gregarización presentan una baja importante en concentraciones clorofílicas (banda 1 y 2), pero que son puntos que están en la frontera de la agricultura de riego y de humedad cerca del río. En la banda 4, donde se produce la reflexión y la transmisión, sufre una baja

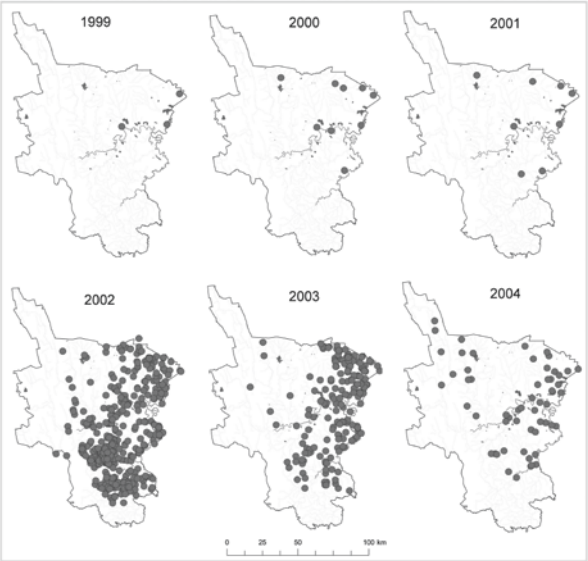


Figura 7. Muestro de la distribución de ninfas gregarias de langosta centroamericana en la Huasteca Potosina por año. Método de "nube de puntos".

considerable (60 y 50%; Figura 8), son suelos desnudos pero húmedos (vertisoles pélicos). Sin embargo, la invasión prevalece en zonas de radianza donde hay fuertes concentraciones de clorofila y altos índices de humedad. El primer parámetro queda claro, la reproducción se realiza al margen de las zonas de cultivo pero necesita suelos con relativa humedad y muy suaves, y para que las generaciones no se detengan, el alimento está al alcance de los adultos.

El río Tampaón es el ecosistema ideal de reproducción, así como el entorno que se desarrolla en su zona de influencia; suelos húmedos y agricultura de riego y temporal. Difícilmente la reproducción se lleva a cabo en los pastizales ya que la humedad que reportan es muy baja, claro que para la alimentación de las mangas serán fundamentales. Con el algoritmo NDVI de LANDSAT ETM+, se determinaron no sólo los niveles de verdor sino los de humedad. Este último parámetro fue primordial tanto en vegetación como en suelo. Las zonas de ovipostura oscilan entre -0.24 a 0.41 cerca del río Tampaón y de las lagunas de Ébano, y aunque es muy amplio el espectro de humedad, se reduce el área de emplazamiento para la reproducción en tanto la ponderación tome en cuenta las otras variables del ecosistema como uso de suelo, vegetación, edafología, pendientes, climas, índice de sequía, etc. Cabe señalar que las diferencias de verdor en la región son importantes, ya que las concentraciones altas se dan en las selvas altas (0.41 a 0.54) que se ubican hacia el sur suroeste de la región; le sigue en orden de importancia las

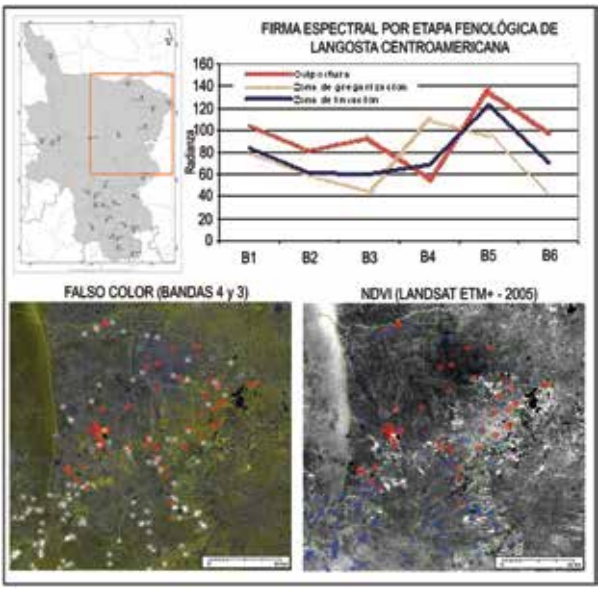


Figura 8. LANDSAT ETM+ (2000), Infrarrojo y NDVI.

selvas bajas (0.17 a 0.31) y los más secos son los pastizales (-0.16 a -0.20). Estos valores son importantes para determinar áreas de emplazamiento, ya que al no haber demasiada humedad en suelo, los vertisoles pélicos tienden a ser duros y eso limita las zonas de reproducción. Por otro lado, habría que evidenciar que tanto en la fase de ovipostura como la de gregarización para el 2004, se localizan puntos nuevos hacia la parte norte (municipio de El Naranjo y Tamasopo) que en 1999 no existían. Esto demuestra que la langosta centroamericana ha encontrado "nuevas zonas de reproducción" que no se describen dentro de la clasificación biogeográfica o taxonómica, y sólo se explican con evidencia de impacto ambiental (deforestación principalmente hacia zonas cañeras). Por ejemplo, al ver el NDVI de LANDSAT MSS de 1973 y ETM+ del 2000 de la región Huasteca Potosina, se puede determinar que los nuevos sitios de ovipostura se han ampliado, porque el verdor y la humedad que dan la propia vegetación primaria se han reducido (Figura 9 y véanse también Figuras 7 y 8). Para las zonas de ovipostura el NDVI regional muestra sitios que van con un NDVI de -0.52 a -0.12 (de muy secos a secos), sin embargo, llegan a ovipositar y gregarizar a niveles de NDVI de 0.15 *(*se extienden las zonas suministro o *source areas*). Este análisis fue básico para entender las correlaciones que integran el ecosistema donde se desarrolla la langosta centroamericana y, a su vez, lograr el análisis espacial a través de la ponderación de variables y la sobreposición de mapas con apoyo de la lógica booleana.

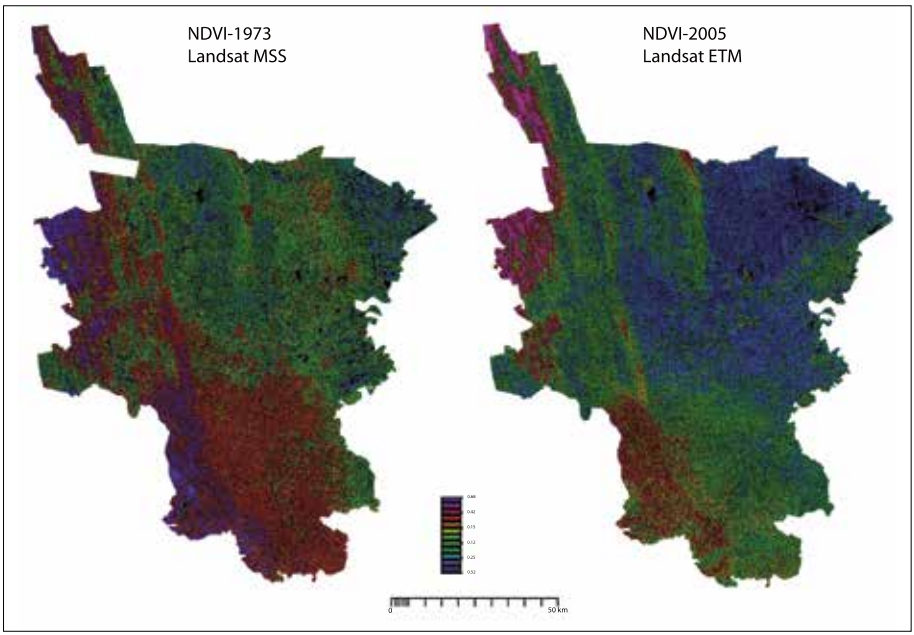


Figura 9. Comparación espectral NDVI LANDSAT (MSS y ETM+) en la Región Huasteca Potosina.

El modelo de simulación multicriterio

La base de datos (muestreo y cartográfica temática) es un modelo realmente representativo del territorio, con la ventaja de que puede ser medido, manipulado y transformado por las funciones del SIG, un modelo que aspira a representar toda la complejidad territorial. Según Heywood *et al*. (2002) representa el tercer nivel de complejidad de un SIG, ya que propone modelos de simulación en raster (retrospectivo y de escenarios futuros), con el soporte de la ponderación y la lógica booleana. En el análisis espacial las respuestas deben generar nueva información para comprender los procesos causales, simular escenarios que no existen y evaluar diferentes alternativas. Hay un encadenamiento complejo para expresar la modelización del territorio. La superposición tiene tal protagonismo porque es la única vía para analizar espacialmente y de forma combinada las múltiples capas de información que forman la base de datos de un SIG. Es una función predominantemente analítica pero también tiene un cometido importante como función de manipulación. Así, la superposición nominal opera con atributos temáticos cualitativos y genera nuevas categorías compuestas con las capas resultantes, que pueden ser

examinadas mediante lenguajes basados en los operadores booleanos (AND, OR, NOT, XOT, IMP y EQV). Este método opera combinando atributos cuantitativos, normalmente con valores continuos, mediante operadores matemáticos como la suma o la exponenciación. El resultado son valores numéricos sintéticos que no permiten conocer la participación de cada una de las dos capas superpuestas en el resultado final. La superposición interrelaciona múltiples capas de información que se combinan de dos en dos en cada operación. Cuando se encadenan las superposiciones correctamente se puede combinar un número virtualmente ilimitado de capas con la única precaución de hacer un buen planteamiento en cada operación y del proceso en conjunto (modelos multicriterio). Los modelos multicriterio de simulación son elementos efectivos para determinar dichas relaciones, y los sistemas de información geográfica para la caracterización y ponderación de las variables que influyen en el fenómeno (Costanza y Voinov, 2004; Heywood *et al.*, 2002). Para llevar a cabo el proceso de superposición multivariable, se utilizaron las cartas temáticas básicas: uso de suelo, climas, índice de severidad a la sequía, edafología, altitudinal y pendientes (elaboradas para el Proyecto de Fondos Sectoriales SAGARPA-CONACYT 2004-CO1-186) y los cortes de los valores NDVI de las imágenes de satélite LANDSAT ETM+ y el muestreo donde se representa la "nube de puntos" de las fases de ovipostura y gregarias de la plaga de langosta Centroamericana. La ponderación (resultado de la superposición geométrica) evidenció que las zonas de agotamiento *(sink areas)*, esto es aquellos lugares donde no invade el taxón son las selvas y los bosques, así como la vegetación secundaria, elementos básicos para entender el límite peligroso para la sobrevivencia de la especie (Figura 10).

Se construyó un operador booleano para cada una de los niveles de peligrosidad y se sobrepuso al modelo digital de terreno para evidenciar la correspondencia. Sin embargo, se pueden acotar las siguientes evidencias: las zonas de *muy alto peligro* al ataque de la langosta centroamericana abarcan el 7.6% (863 ha) de la región (Figura 11). Estas serán las zonas de reproducción y suministro en cuanto se den las condiciones meteorológicas idóneas (sequías largas y presencia del "Niño"). Los valles intermontanos con uso de suelo agropecuario serán los próximos sitios no sólo de invasión, sino de reproducción sobre todo hacia la parte noreste que abarcan los municipios de El Naranjo y Tampasopo. Las zonas de *peligro alto* serán las áreas de invasión del taxón, ahí no habrá reproducción pero sí fuente de alimentación y comprenden el 27.95% (3169 ha) de la superficie agropecuaria. Las áreas de *medio a bajo* serán zonas de invasión esporádicas en el caso que se ahuyente al taxón con ruidos estruendosos (los aviones de fumigación por ejemplo) que forcé el avance hacia sitios de humedad intermedia a alta, pero

Ponderación

	Uso de suelo	Pendiente	Altitud	Suelos	Humedad (NDVI)	Otro
Muy alto	Agropecuario	Menor a 5°	Menor a 100 m	Vertisol & rendzina	0.30 - 0.60	Zonas inundadas
Alto	Agropecuario	Menor a 5°	Menor a 100 m	Vertisol & rendzina	0.30 - 0.60	Sin zonas inundadas
Medio	Agropecuario	De 6° a 15°	Mayor a 100 m	Vertisol & rendzina	0.00 - 0.30	Sin zonas inundadas
Bajo	Agropecuario	De 16° a 35°	Mayor a 100 m	Otro suelo	0.00 - -0.60	Sin zonas inundadas
Muy bajo	Agropecuario	Mayor a 36°	Mayor a 100 m	Otro suelo	0.00 - -0.60	Sin zonas inundadas

Operaciones *Booleanas* y Modelado Espacial

```
Alto:=iff([humedad="mayor a 80"]and[temp="Mayor a 20"]and[precipita_A="de 1800 a 2000 mm"]and[direccion_A_corte="Sur"],"Alto",?)
```

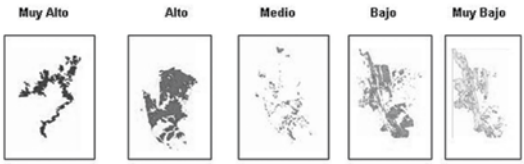


Figura 10. Modelado espacial: ponderación y operaciones booleanas para la construcción del mapa de peligros al ataque de langosta centroamericana en la Huasteca Potosina.

no benéficos para el desarrollo del taxón. Las zonas sin riesgo serán aquéllas con altas concentraciones de humedad como son selvas y bosques. Este modelo de simulación permite entender las relaciones del medio ambiente que hacen posible la presencia de la plaga de langosta centroamericana en la región, sin embargo, esta visión es preliminar ya que la complejidad viene con el enriquecimiento de información, de nuevos muestreos que evidencien de forma contundente el comportamiento, pero, sobre todo, las relaciones meteorológicas comprobables como puede ser la correlación con el fenómeno del "Niño" para el modelo predictivo. También es necesaria la evaluación de la vulnerabilidad y el conflicto social que prevalece en las zonas de alto impacto ambiental para determinar el desastre no sólo del último ataque, sino la visión a futuro.

Resultados y discusión

Según la superposición de las siguientes coberturas: *a)* Mapa de peligros al ataque de la plaga de langosta centroamericana (*Shistocerca piceiforns piceiforns Walter*), 1960-2004; *b)* el inventario agropecuario del 2000, y *c)* la tenencia de la tierra (2000) en la Huasteca Potosina; los resultados fueron los siguientes: el 66% de la zona agropecuaria de la Huasteca Potosina, los cultivos que sufrieron pérdidas

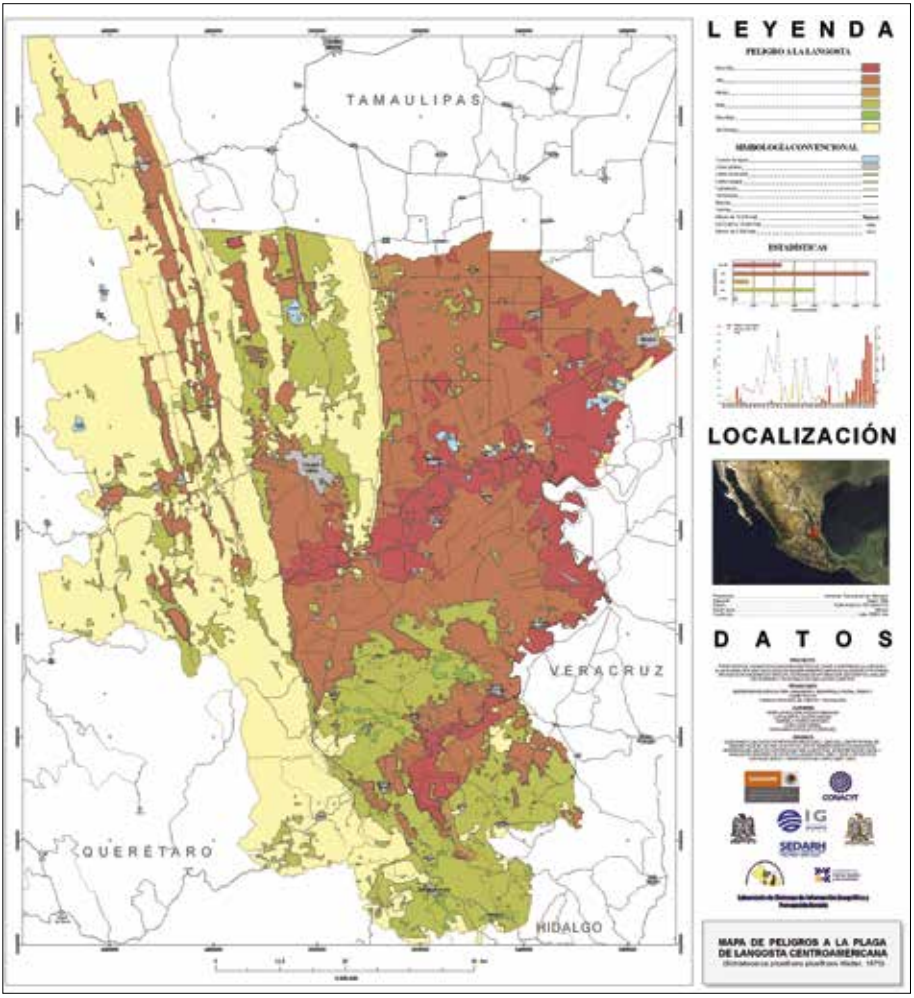


Figura 11. Mapa de riesgos al ataque de plaga de langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons* Walter, 1870) en la Huasteca Potosina, 1960-2004.

importantes fueron el de caña de azúcar (26%), los pastizales (20%), los forrajes (12%), las hortalizas (5%) y los cítricos (3%). El 62% de las áreas afectadas fueron de propiedad ejidal y 38% privadas. Sin embargo, el problema principal es la afectación de la población rural ya que el 64% dependen sus ingresos de manera directa de las actividades agropecuarias (INEGI, 2000). Los resultados evidencian que las zonas de muy alto riesgo al ataque de plaga de langosta centroamericana son aquéllas en donde se lleva a cabo la ovipostura y gregarización más que la invasión de la plaga misma. Estas zonas tienen la característica básica de presentar un alto impacto ambiental, esto es, procesos de deforestación severos y cambios espaciales extremos. En este sentido, la artificialización del espacio hacia actividades agropecuarias garantiza la plusvalía del suelo y la competencia entre cultivos, pero de manera paralela (inversamente proporcional) se desarrollan los ecosistemas antrópicos como son las estepas. Al estar un ecosistema implantado, las especies indicadoras de flora y fauna comienzan a hacerse evidente. Muchos de ellos ya estaban presentes en el ecosistema anterior, pero no se desarrollaban y estaban en estado de latencia. Al desaparecer los depredadores y darse las condiciones favorables para su desarrollo y reproducción, invaden los espacios no sólo como plagas sino como especies indicadoras. Así, la deforestación es la variable independiente del sistema, ya que al superponer nuevas variables y nuevas condiciones al espacio, cambia por completo el resto. Entonces resulta ser que no es la temperatura la variable independiente como se sostiene desde la visión agroecológica o entomológica, ya que ésta depende de manera directa del sustrato vegetal. Por otro lado, el mapa de riesgos a la plaga de langosta centroamericana, conduce a la propuesta metodológica del taxón que generaliza las condiciones idóneas de reproducción, y que puede sobreponerse al caso de la cuenca del Senegal con langosta migratoria o del desierto, a la *cancellata* de las estepas de la cuenca del río de Plata.

Este modelo de simulación puede servir de base para la predicción de la plaga misma y la toma de decisiones para su control. Al corto plazo es saber con exactitud donde llevar a cabo el manejo integrado o químico de la plaga misma, la segunda y de larga duración sería la reforestación de esos espacios de mayor riesgo, ya que una de las limitantes para la expansión del taxón son precisamente los biomas de selvas y bosques. La reforestación con pagos por servicios ambientales sería una buena opción para la población y no sólo se combatiría la plaga de langosta como tal, sino sería un elemento básico para crear condiciones de mitigación para la sequía que también afecta de forma grave esta zona. Dentro del marco de los geosistemas, el análisis espectral es fundamental dentro del diagnóstico del área de distribución o emplazamiento del tazón, sin embargo, con un monitoreo constante (por ejemplo, con imágenes AVHRR) se tendrían los escenarios antes,

durante y después de la invasión de la plaga, así se sabría la variación exacta de las concentraciones de verdor y de humedad no sólo de la vegetación sino del suelo.

El análisis espectral justifica y corrobora la información de campo (muestreo) por etapa fenológica, lo que ayuda a controlar a la plaga cercándola en aquellas zonas donde no puede desarrollarse o en su caso tomar las decisiones adecuadas para su control y evitar diseminarla o expandirla, porque con ello se desplaza el peligro en cuanto se localicen otras zonas para su reproducción, pero peor aún, con ello se desplazan los pesticidas empleados para su control. La ponderación es el paso final, lo más importante en esta fase es que cada especialista elabore la cartografía de cada elemento del ecosistema que interviene en la reproducción y propagación de la plaga. Lo básico del trabajo es el muestreo en campo, que debe darle un seguimiento constante hasta que aparezca la nueva invasión, para determinar tiempos exactos, de hecho esta parte es la que debe implementarse de manera obligatoria en las campañas fitosanitarias del país, no suspender la campaña mientras no haya plaga, sino al contrario, trabajar de manera permanente para ver las dinámicas entre un ciclo y otro, aunque el factor limitante son los recursos financieros con los que cuenta tanto el Estado como la federación para sostener de manera permanente las campañas fitosanitarias.

Agradecimientos

Este trabajo es resultado del proyecto de Fondos Sectoriales SAGARPA-CONACYT-COFUPRO y Fundación Produce intitulado "Propuesta de una metodología para identificar zonas vulnerables a la sequía y a las plagas que afectan a las actividades agropecuarias en la Huasteca Potosina, apoyada en imágenes de satélite, sistemas de información geográfica, análisis multivariado y un modelo de simulación climática", CLAVE: SAGARPA-CO1-186/A-1 (de abril de 2005 a diciembre de 2006).

Referencias

Aguilar, (1995), *Autopsia de un fracaso: el caso del proyecto Pujal-Coy de la Huasteca Potosina*, Ed. Ponciano Arriaga, San Luis Potosí, México.

Amador, J. A. (1998), "A climate feature of the tropical Americas: the trade wind easterly jet", *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 5(2).

Barrientos, L. L. (1990), *Final report of mission on Central America Locus (18th October 1989-10th september1990)*, FAO, Rome, Italy.

Barrientos, L. L. (1998), "La langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons* Walter, 1870) (*Orthoptera: Acrididae*). Plaga mayor de la agricultura en el sureste de México y Centroamérica. Impacto y significancia", en *BIOTAM*, vol. 2, núm. 2, (agosto-noviembre 1990).

Barrientos, L. L., C. F. Astacio, B. Álvarez y O. Poot M. (1992), *Manual Técnico sobre la langosta voladora Shistocerca piceifrons piceinfrons Walker y otros Acridoideos de Centro América y Sureste de México*, FAOAGOL/IRSA, San Salvador.

Bryceson, K. P. (1989), "The use of Landsat MSS data to determine the distribution of locust eggbeds in the Riverina region of New South Wales, Australia", *Int. J. Remote Sensing* 10(11), pp. 1749-1762.

Centre for Overseas Pest Research (1992), *The locust and grasshopper agricultural manual*, Londres.

CESAVESLP (1999-2004), Comité Estatal de Sanidad Vegetal de San Luis Potosí. Informes Técnicos, San Luis Potosí, México.

Cigliano, M. M., W. P. Kemp and T. Kalaris (1995a), "Spatiotemporal characteristics of rangeland grasshopper (*Orthoptera: Acrididae*) regional outbreaks in Montana", *Journal of Orthoptera Research*, no. 4, pp. 111-126.

Cigliano-Torrusio, M. M. (2003), "Sistemas de Información Geográfica y Teledetección en Entomología: aplicación en tucuras y langostas (*Orthoptera: Acridoidea*)", *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 62(1-2), pp. 1-14.

Contreras, C., M. G. Galindo y ¿? Algara (2006), "El fenómeno de "El Niño", la sequía y su relación con la presencia de la langosta en la Huasteca Potosina", en *Memorias del I Seminario Latinoamericano de Plagas Transfronterizas. Nuevos escenarios y nuevos retos en la sanidad vegetal*, 25 al 27 de octubre, San Luis Potosí, México**.**

Costanza and Voinov (2004), *Landscape simulation modeling. A spatially explicit, dynamic approach*, Springer-Verlag, New York.

Cressman, K. (1997), "Swarms: a geographic information system for desert locust forecasting", in Krall, S., R. Peveling and D. Da Diallo (eds.), *New Strategies in Locust Control*, Birkhauser Verlag, Basel, Switzerland, pp. 27-35.

Devenson-Hunter, (2002), "The operation of a GIS-BASED decision support system for Australian locus management", *Entomologia* SINICA, vol. 9, no. 4, December, pp. 1-12.

Espinosa y Llorente, (1993), *Fundamentos de biogeografías filogenéticos*, UNAM, México.

FAO (2001a), "Los efectos económicos de las plagas y enfermedades transfronterizas de los animales y de las plantas", parte III, en *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2001*, New York.

FAO (2001b), Suplemento N º 1 del Glosario: Directrices sobre la interpretación y aplicación del concepto de control oficial para las plagas reglamentadas, 2001. NIMF N° 5, FAO, Roma, en *Glosario de términos fitosanitarios*, NIMF Nº 5, FAO, Roma.

Florescano, E. y S. Swan (1995), *Breve historia de la sequía en México*, Universidad Veracruzana, Xalapa, México.

Galindo, M. G. y L. Olvera (2005), "El inventario agropecuario en la Huasteca Potosina: primeros resultados en la construcción de cartografía básica y temática para el reordenamiento de las actividades agropecuarias apoyado en PR y SIG", en *Memorias del II Congreso Internacional de Ordenación del Territorio*, 14 al 126 de septiembre, Guadalajara, Jalisco, México.

Galindo, M. G. y L. Olvera (2006), "Vegetación y uso de suelo de la Huasteca potosina 1973, 1980, 2000", escala 1:250 000, Proyecto SAGARPA-CONACYT, 2004-CO1-186.

Galindo, M. G. (2006), "Cuantificación del desastre y monitoreo de la plaga de langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons Walter*) en actividades agropecuarias con sensores de alta resolución, SIG y modelos multivariados de simulación. Estudio de caso: la Huasteca Potosina-México", *Memorias del I Seminario Latinoamericano de Plagas Transfronterizas. Nuevos escenarios y nuevos retos en la sanidad vegetal*, 25 al 27 de octubre, San Luis Potosí, México**.**

Garza, E. (2005), "La langosta *Shistocerca pceifronspceifrons* y su manejo en la planicie huasteca", Folleto técnico no. 12, INIFAP-CIRN, Campo Experimental Ébano, Fundación Produce-San Luis Potosí.

Garza, E. (2005a), "El chapulín *Melanoplus sp*. y su manejo en la planicie huasteca", Folleto técnico no. 11, INIFAP-CIRN, Campo Experimental Ébano, Fundación Produce-San Luis Potosí.

Heywood, Cornelius y Carver, (2002), "An introduction to Geographical Information System", Prentice Hall Spatial data Modeling, Cap 3 Data analysis, Cap. 6.

Hernández Cerda, M. E. (2006a), "Climas de la Huasteca Potosina", escala 1:250 000, Proyecto SAGARPA-CONACYT, 2004-CO1-186.

Hernández Cerda, M. E. (2006b), "Índice de sequía en la Huasteca Potosina", escala 1:250 000, Proyecto SAGARPA-CONACYT, 2004-CO1-186.

Hielkema, J. U. and F. L. Snijders (1993), "Operational use of Environmental Satellite Remote Sensing and Satellite Communications Technology for Global Food Security and Locust Control", Informe de la FAO, p. 21.

Hunter-Deveson, (2002), "Forecasting and management of migratory pests in Australia", in *Entomológica* SINICA, vol. 9, no. 4, December, pp. 13-25.

Hunter, (2004), "Advances in the control of locusts (*Orthoptera: Acrididae*) in eastern Australia: from crop protection to preventive control", in *Australian Journal of Entomology*, vol. 43, pp. 293-303.

INEGI (1999-2004), *Anuarios estadísticos del estado de San Luis Potosí*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

INEGI (2001), *Toponimia y vectoriales de la carta topográfica 1:50000*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

Johnson, D. L. (1989), "Spatial analysis of the relationship of grasshopper's outbreaks to soils classification", en Mc Donald, L. L., Br. Manly, J. A. Lockwood and J.

Logan (eds.), *Estimation and analysis of insect populations*, Springer-Verlag, New York, pp. 357-370.

Kemp, W. P., D. McNeal and M. M. Cigliano (1996), "Geographic Information System (GIS) and Integrated Pest Management of Insects", in Cunningham, G. L. and M. W. Sampson (eds.), *Grasshopper integrated pest management ser handbook*, Tech. Bull. 180, US Department of Agriculture, Animal and Plant Health Inspection Service, Washington D. C, VI.9-1- VI.9-10 p.

Lecoq, M., J. F. Duranton and T. Rachadi (1997), "Towards an integrated strategy for the control of the desert locust", in Krall S., R. Peveling and D. Da Diallo (eds.), *New Strategies in Locust Control*, Birkhauser Verlag Basel, Switzerland, pp. 467- 475.

Lecoq, M. (2000), "How can acridid population ecology be used to refine pest management strategies?", in Lockwood, J. A., A. V. Latchininsky and M. G. Sergeev (eds.), *Grasshoppers and Grassland Health*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 109-130.

Magor, J. I. and J. Pender (1997), "Desert locust forecasters' GIS: a researchers' view", in Krall, S., R. Peveling and D. Da Diallo (eds.), *New Strategies in Locust Control*, Birkhauser Verlag Basel, Switzerland, pp. 21- 26.

Manilla, (1996), *Desastres modelo para armar. Colección de piezas de un rompecabezas social*, LA RED, Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina.

Mass-Krey, (1993), *Los desastres nos son naturales*, LA RED, Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina.

Miranda, E., M. Lecoq, J. R. Pierozzi, J. Duranton, J. et M. Batistella (1996), *O gafanhoto do Mato Grosso. BalanVo perspectivas de 4 anos des pesquisas 1992-1996*, Montpellier.

OIRSA (2005), *Sistema Integrado de Sanidad Agropecuaria*, Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria

Retana, J. (2003), "Relación entre la temperatura superficial del mar (TSM) y anomalías de temperatura del aire en el Pacífico norte de Costa Rica durante años ENOS como posible predictor de potencialidad de plaga de langosta", en *Tópicos de Meteorología y Oceanografía*, 10(1), pp. 31-35.

Rendowsky, J. (1978), *La vegetación de México*, Limusa, México.

SENASICA (2005), *Acuerdos internacionales sobre medidas sanitarias y fitosanitarias*, Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria

Teixeira, y Monné (2005), "La distribución de Tropidacris cristata (Orthoptera: Acridoidea) según la "Historia rerum naturalium Brasiliae" de Georg Marcgrave (1648)", en *Regionalización biogeográfica en Iberoamérica y tópicos afines*, Primera Jornada Biogeográfica de la Red Iberoamericana de Biogeografía y entomología sistemática, RIBES XII.I-CYTED-UNAM-CONABIO.

Tinoco, (2001), *Entomología económica aplicada a la agricultura*, Ed. AGATA, Guadalajara, Jalisco-México.

Trenberth, K. E. (1997), "The definition of El Niño", *Bull. Amer. Met. Soc.*, no. 78, pp. 2271-2777.

Voss, F. and U. Dreiser (1997), "Mapping of desert locust habitats using remote sensing techniques", in Krall, S., R. Peveling and D. Da Diallo (eds.), *New Strategies in Locust Control*, Birkhauser Verlag Basel. Switzerland, pp. 47- 54.

Zunino y Zullini (2003), *Biogeografía. La dimensión espacial de la evolución*, Fondo de Cultura Económica, México.

Conceptos de Geomática y estudios de caso en México se terminó de imprimir el 25 de noviembre de 2009, en los talleres de Navegantes de la comunicación gráfica, S.A. de C.V. Pascual Ortíz Rubio, no. 40, San Simón Ticumac, Del. Benito Juárez, 03660, México, D.F.
El tiraje consta de 500 ejemplares impresos en offset sobre papel cultural de 90 gramos para interiores y couché de 250 gramos para los forros. Para la formación de galeras se usó la fuente tipográfica Adobe Garamond Pro, en 9.5/10, 10/12, 11.2/12.7 y 16/19 puntos.
Edición realizada a cargo de la Sección Editorial del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Revisión y corrección de estilo: Martha Pavón. Diseño, formación de galeras y cuidado de la impresión: Laura Diana López Ascencio. Fotografía de portada: Raúl Aguirre.

Conceptos de Geomática y estudios de caso en México

Raúl Aguirre Gómez
Coordinador

La Geomática, a manera de definición, es un término científico moderno que sirve para expresar la integración sistémica de técnicas y metodologías de adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis, presentación y distribución de información geográficamente referenciada.

Estos datos espaciales provienen del análisis y de mediciones hechas con diversas técnicas empleadas en disciplinas tales como: la geodesia y la topografía, la cartografía, la teledetección o percepción remota, la fotogrametría, la geoestadística o análisis espacial, los Sistemas de Posicionamiento Global y los Sistemas de Información Geográfica.

Hoy en día, la mayoría de los países del mundo utiliza la Geomática en la solución de problemas que requieren de un análisis espacial y México no es la excepción. De esta manera, el presente libro surge de la necesidad de mostrar ejemplos relevantes del "quehacer geomático" que se está realizando en nuestro país por un conjunto de especialistas altamente capacitados en una o varias de las disciplinas constituyentes de la Geomática. Para lograr esto, contamos con la invaluable participación de investigadores de las siguientes instituciones: Universidad de Guadalajara, Universidad Autónoma del Estado de México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí y la Universidad Nacional Autónoma de México.

ISBN: 978-607-02-0973-4

9 786070 209734