

01167
4
2ej

PERCEPCION REMOTA
Y
PROCESAMIENTO DE IMAGENES
DIGITALES
EN LA
GESTION INFORMATICA
PARA LA
PLANEACION

JORGE GARCIA JURADO REBORA

1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

"...y sin embargo, se mueve."
Galileo Galilei, algún día de 1633

"Dios no existe.
He subido al cielo y no le he visto por ningún lado."
Yuri Gagarin, 1961

"Un pequeño paso para el hombre,
un gran salto para la humanidad."
Neil Armstrong, 1969

Dedico este trabajo a la memoria de todos aquellos que dieron su tiempo, trabajo y vida a cambio de logros trascendentes en desarrollos astronómicos.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer con una gran estimación al M.I. Gonzalo Negroe por su apoyo, su comprensión, y sobre todo, su fe en que algún día terminaría este trabajo. Gracias Gonzalo. Agradezco al Dr. Sergio Fuentes Maya las facilidades que me otorgó para la realización de esta tesis, así como el ser mi guía en ciertos aspectos de superación personal, algún día le haré caso.

Al Dr. Juan Pablo Antún por haberme introducido en el interesantísimo arte de la Percepción Remota.

Al Dr. Román Alvarez por sus atinados comentarios y sabios consejos para la tesis.

A la música, por ser mi fuente de inspiración y motivación cada vez que necesito de ellas.

"The farther one travels, the less one knows."
George Harrison, 1968

LA PERCEPCION REMOTA Y EL PROCESAMIENTO DE IMAGENES DIGITALES EN LA GESTION INFORMATICA PARA LA P L A N E A C I O N

CONTENIDO

<i>INTRODUCCION</i>	<i>I</i>
1. GESTION INFORMATICA EN LA PLANEACION	5
1.1 Planeación	5
1.2 Definición y características del concepto de planeación	7
1.3 Sistemas	9
1.4 Información	10
1.5 Sistemas de información	12
1.5.1 Construcción de bloques	13
1.5.2 Diseño de fuerzas	16
2. LA PERCEPCION REMOTA	23
2.1 Introducción	23
2.2 Bosquejo histórico	25
2.3 Plataformas espaciales: Conceptos orbitales	28
2.4 La física de la Percepción Remota	30
2.4.1 Fuentes de energía y principios de radiación	30
2.4.2 Interacciones entre la energía y las características superficiales de la Tierra	34
2.4.3 Reflectancia espectral de vegetación, suelo y agua	37
2.5 El Sistema Landsat	40
2.6 El Sistema SPOT	42

3. EL PROCESAMIENTO DE IMAGENES DIGITALES	47
3.1 Introducción	47
3.2 Definiciones básicas	48
3.3 Imágenes multispectrales	50
3.4 Un enfoque sistémico del procesamiento de imágenes digitales	52
3.4.1 Sistemas de adquisición de imágenes digitales	53
3.4.2 Técnicas de procesamiento de imágenes	53
3.4.2.1 Técnicas subjetivas	54
3.4.2.1.1 Procesamiento en blanco y negro	54
3.4.2.1.2 Procesamiento en colores	62
3.4.2.1.3 Filtrado espacial	72
3.4.2.2 Técnicas cuantitativas	75
3.4.2.2.1 Transformaciones geométricas	75
3.4.2.2.2 Corrección de la distorsión radiométrica	82
3.4.2.2.3 Clasificación multispectral	83
3.4.3 Despliegue de imágenes	86
3.4.3.1 Sistemas volátiles de despliegue de imágenes en blanco y negro	87
3.4.3.2 Sistemas volátiles de despliegue de imágenes en color	90
3.4.3.3 Sistemas permanentes de despliegue de imágenes	92
4. APLICACIONES A LA PLANEACION	97
4.1 Introducción	97
4.2 Percepción remota y el medio ambiente humano	98
4.2.1 Estructuras rurales	98
4.2.2 Areas urbanas	100
4.2.3 Sistemas de transporte	102
4.2.4 Complejos industriales	104
4.2.5 Contaminación ambiental	105
4.2.6 Demografía y cambios sociales	108
4.2.4.1 Estudios de población	108
4.2.4.2 Cambios en el medio ambiente construido	111
4.3 Sistemas de información geográfica	113
4.3.1 Cartografía y mapas	118
4.3.2 Entrada y agrupación de datos	119
4.3.3 Base de datos geográfica	119
4.3.3.1 Base de datos gráfica	120
4.3.3.2 Base de datos de atributos	120
4.3.4 Análisis de datos, modelado y manipulación cartográfica	121
4.3.5 Salida de datos	122
4.4 Ejemplo del procesamiento de una imagen para aplicaciones en Planeación	123

5. REALIDADES Y PERSPECTIVAS	143
5.1 Introducción	143
5.2 Percepción Remota	143
5.2.1 Imágenes tomadas por satélites	144
5.2.2 Fotogrametría	146
5.2.3 Videogrametría	146
5.3 Procesamiento de imágenes digitales	147
5.4 Sistemas de Información Geográfica	150
5.5 Estado actual de la Percepción Remota en México	151
5.6 SELPER	154
5.7 Perspectivas de la Percepción Remota en la Planeación	155
5.7.1 Perspectivas para el planeador: planteamiento de posibles casos de aplicación	155
5.8 Conclusiones	158
 REFERENCIAS	 161

INTRODUCCION

Por todo lo que se conoce dentro del paradigma de la Planeación, una de las actividades más importantes del planeador es identificar la problemática que afecta a cualquier organización para, de esa manera, apoyar la toma de decisiones. Para tal efecto, es indispensable la obtención de datos para analizarlos, procesarlos y obtener así la información como materia prima en el establecimiento y selección de alternativas. Es evidente que sin información es imposible tomar una decisión adecuada.

Por otro lado, en una época de generación de gran cantidad de información, como lo es la actual, es indispensable tener parámetros que permitan calificar la información con que se cuenta para la toma de decisiones, a fin de evitar el poner en práctica alguna acción incorrecta, no por haber cometido un error en el análisis de decisiones, sino por no haber identificado la información de calidad al momento de hacerlo (los parámetros de calidad de la información se analizarán con detalle en el primer capítulo).

Es también evidente que se puede obtener información en cualquier parte, unas veces a costos muy accesibles, otras veces a costos más elevados, todo en proporción a la utilidad o beneficio que acarreará la obtención de dicha información, pero la información seleccionada y calificada como aceptable para los intereses del decisor es muy valiosa por la utilidad marginal que reeditará al llegar el momento de actuar correctamente, y por lo mismo, suele ser más costosa que la información no calificada.

Frecuentemente, el precio que hay que pagar por datos de calidad es alto, sin embargo, los usuarios no pueden darse el lujo de invertir grandes cantidades de dinero en su adquisición, por lo que deben estar seguros de que realmente les serán de utilidad. En otras ocasiones, la adquisición de los datos puede volverse una tarea, si no complicada, si laboriosa y que requeriría tiempo que, en general, sería más valioso si se utilizara en análisis. Para evitar este tipo de conflictos, y dado que el tiempo es un recurso cuyo aprovechamiento óptimo es fundamental para el proceso de Planeación, existe la inquietud de emplear herramientas modernas y de alta tecnología que, aunque requieren de una inversión inicial grande (después se verá la cuantificación de este adjetivo), a largo plazo resultan más económicas que el tener que usar técnicas tradicionales de recopilación de datos para avalar la toma de decisiones.

Una de estas tecnologías que aparece como apoyo a la Planeación es la percepción remota que, junto con el procesamiento de imágenes digitales, permiten captar información en un tiempo pequeño y en espacio reducido, como lo es el de una imagen dentro de un computador.

Evidentemente, existen problemáticas en las que la Planeación no puede apoyarse en el uso de técnicas de percepción remota, solamente aquellas que necesiten información espacial y que pueda ser adquirida, ya sea con sensores colocados en plataformas espaciales, o bien, con fotografías aéreas. Pero en tales situaciones, como pueden ser las comprendidas dentro de los campos de planeación urbana, regional, portuaria, de transporte, etc., se solventaría el problema de emplear tiempo excesivo, de ser así, en la captura de datos en los sitios de análisis con esta tecnología moderna, si es que el problema lo amerita. Los objetivos del presente trabajo son proponer, analizar y difundir el uso de la Percepción Remota y del Procesamiento de Imágenes Digitales como apoyo al proceso de obtención de información para la toma de decisiones.

Para llevar al cabo lo anterior, el trabajo está dividido en cinco partes. La primera establece las bases teóricas informáticas que fundamentan el uso de las técnicas propuestas. Una vez justificado su uso al través de una necesidad insoslayable de aprovechamiento del tiempo, la segunda parte presenta un panorama general y fundamental de la percepción remota, tanto en el aspecto conceptual como en el físico, basado en documentación que se tiene a la mano, con el objeto de que los usuarios potenciales del área de Planeación se familiaricen con el lenguaje y aspectos teóricos, y exista así una mayor comprensión de la herramienta. La tercera parte establece las bases para la comprensión del procesamiento computarizado de imágenes, principalmente las de percepción remota. La cuarta parte da la pauta en lo referente a aplicaciones de estas técnicas, y enfatizando el impacto de la percepción remota sobre estudios ya realizados de Planeación, para desembocar en la quinta y última parte que permite conocer, de manera general, el estado del arte de la percepción remota, del procesamiento de imágenes y de los sistemas de información geográfica disponibles actualmente en el ámbito comercial y de investigación de nuestro país.

Cabe aclarar, con el objeto de evitar cualquier mal entendido, que el empleo de la percepción remota en la Planeación en México, se encuentra actualmente en un proceso de evaluación en cuanto a sus resultados. Los trabajos que existen en este sentido, han sido puramente de investigación en centros que cuentan con los recursos necesarios para abrir tales líneas. Los sectores que pudiesen constituirse como usuarios y que pretenden su aplicación aún están reacios a emplearla. Esto se debe a los altos costos que suponen, la adquisición de infraestructura y equipamiento para su manejo, a la capacitación del personal dedicado al mismo, a la obtención de imágenes para estudios específicos, así como a otro tipo de limitaciones adicionales al aspecto económico, como el tiempo de espera en la adquisición de imágenes, el tiempo de capacitación y el tiempo en la recopilación de datos de campo como complemento a las imágenes. Mientras siga existiendo la ruptura actual entre los centros de investigación y la llamada "vida real", estas

herramientas tardarán mayor tiempo en ser empleadas.

Este trabajo pretende ser lo más objetivo posible en relación con lo anterior. No se ha podido evaluar cuantitativamente el beneficio que acarrea el uso de estas herramientas, sin embargo, el número de áreas de aplicación va en constante aumento, por lo que en un futuro cercano la percepción remota se volverá necesaria para que el proceso de toma de decisiones sea eficiente. No se pretende presentar en esta tesis un caso real de aplicación en nuestro medio, ya que el tiempo empleado en él será demasiado extenso para la concreción del actual trabajo. Existe ya un estudio de caso elaborado en otra tesis de esta División en el que se emplea percepción remota, pero el cual está complementado con un fuerte trabajo de campo, lo cual hace aparentar que es precisamente la percepción remota lo que sirve como complemento a los estudios de campo (Santos, 1992), no obstante en dicho estudio se aprecia cómo es posible aplicar la percepción en estudios de crecimiento de áreas urbanas.

Tampoco es objetivo de este trabajo incursionar y proponer novedades en los fundamentos teóricos de la Percepción Remota ni del Procesamiento de Imágenes Digitales, puesto que existen actualmente muchos grupos de trabajo en una gran cantidad de universidades en el extranjero, y particularmente en esta nuestra Máxima Casa de Estudios (ver capítulo cinco), que se dedican a desarrollar técnicas mejoradas respecto a las ya existentes. El área de Planeación es tan sólo un usuario más en la creciente lista de actividades a las que se les puede asignar Percepción Remota, y como tales, se expondrán las problemáticas y circunstancias en las que pueden aplicarse las técnicas, así como proposiciones a su mejoramiento aplicado.

Deseo muy sinceramente que este trabajo aporte, tanto conocimientos como inquietudes para continuar adelante con él, en favor de la conservación y el mejoramiento del medio ambiente en este planeta que, bien que mal, es el único con que hasta ahora contamos para vivir. El futuro de la especie humana depende enteramente del futuro de nuestra Tierra, cuyo mañana está, coincidentemente, en manos de la misma especie humana. A nosotros nos toca su estudio, comprensión y solución de problemas. Cualquier aportación en beneficio de esta causa será bienvenida.

1. GESTION INFORMATICA EN LA PLANEACION

1.1

PLANEACION

Planeación: Acción de planear.

Planear. ¿Qué es planear? ¿Sirve de algo? ¿Interesa a alguien? ¿Para qué planear? Un tema tan vasto es obvio que origine tantas interrogantes. Afortunadamente, tantas interrogantes tienen respuesta, no solamente dentro de un marco teórico lleno de definiciones y conceptos que a veces sólo confunden, sino en la práctica, en donde las acciones toman una dimensión real, en donde la repercusión es grande, en donde las malas decisiones se toman en problemas graves, en donde es necesario pensar bien las cosas que se van a hacer para satisfacer los requerimientos que existan, en donde las responsabilidades son tan grandes que el riesgo que se corre al actuar, sobrepasa los límites de la capacidad económica que se tiene, en donde está en juego el futuro de una persona, de una comunidad, de un país.

Planear es, según el diccionario de uso corriente, establecer o trazar un plan. Evidentemente, el término tiene distintas connotaciones dependiendo del marco teórico que se aplique para su estudio, por lo que la definición antes descrita es bastante vaga. En la edad de piedra, el hombre tenía muchas necesidades, pero el cumplirlas de ninguna manera requería de trazar planes. Si el hombre necesitaba alimento, cazaba o recolectaba, si necesitaba agua, se establecía en las cercanías de algún riachuelo, si necesitaba protección, se instalaba dentro de alguna cueva en una montaña.

Conforme el hombre fue adquiriendo ciertas responsabilidades dentro de una comunidad, y conforme fue aumentando su conocimiento del medio que lo rodeaba, estableció sin saberlo, algunos planes; por ejemplo, al darse cuenta de las estaciones del año, debió planear

la temporada de siembra para poder después cosechar lo que había sembrado. Debí planear, además, la manera de construir su vivienda para protegerse lo mejor posible de las inclemencias del tiempo, así como la forma de conseguir alimento sin alejarse demasiado de su comunidad, etc.

El establecimiento y trazado de planes han acompañado al hombre en casi todas sus actividades a lo largo del tiempo: Colón tenía un plan trazado de viaje hacia el occidente por las aguas del Atlántico; Hílay planeó la mejor ruta para atacar la cumbre del Everest; y Magallanes estableció un plan de navegación por todo el mundo. Sin la planeación, un alto porcentaje de las exploraciones que el hombre ha realizado en el planeta, se habrían quedado en las mentes de los exploradores y no se hubiesen llevado al cabo; ...y así llegamos a nuestros días. El hombre no hubiese pisado el suelo lunar de no haber sido por la elaboración de un plan por parte de la NASA.

Pero la planeación no sólo ha ido de la mano del hombre en las exploraciones y expediciones. Actualmente, ningún país se puede permitir el lujo de no planear su desarrollo. El construir presas que no se llenen, carreteras que se saturen inmediatamente, aeropuertos para dos o tres operaciones diarias, grandes puentes donde el tránsito no lo justifica, grandes concentraciones de asentamientos humanos en zonas urbanas y dispersión en zonas rurales, todas estas acciones requieren ser planeadas. El ordenamiento del territorio y el desarrollo económico equilibrado no se dan al azar, son resultados de un proceso integral de planeación.

La planeación, en un contexto de desarrollo nacional, se usó solamente en los países socialistas hasta el final de la 2a. Guerra Mundial. A partir de ésta, se ha extendido también a una gran cantidad de economías capitalistas y ha cobrado especial importancia en los países en desarrollo, empeñados en programar su evolución económica. La aplicación de las técnicas de planeación ha mostrado su conveniencia, sobre todo en economías donde la existencia de recursos productivos desocupados hace necesario usarlos de manera eficaz y sostenida.

Los mecanismos de planeación se empezaron a usar sistemáticamente en los países arrasados por la última Gran Guerra, donde resultaban indispensables para canalizar adecuadamente la ayuda externa. Ahora, esos países constituyen un ejemplo de cómo han evolucionado estas técnicas ante los cambios económicos de la postguerra (Japón y Alemania).

Se ha llegado a la frontera de los recursos naturales en el mundo, de manera que ya no existen las condiciones de épocas anteriores, en las que se podía obtener el beneficio de algún recurso de disponibilidad muy amplia, sin sacrificar otro. Ahora, los recursos son competitivos no sólo en cuanto a sus costos, sino también en lo que se refiere a sus usos. Esto es especialmente dramático en el plano internacional, donde cada vez es más difícil cerrar la brecha de desigualdad "razonable" entre las naciones, que dentro de poco requerirán de hasta sextuplicar los recursos existentes, cosa prácticamente imposible. Es por esto que los países subdesarrollados que pretendan alcanzar la situación de las economías

industrializadas, se toparán con obstáculos insalvables si no se establece un nuevo orden económico internacional en donde, en alguna medida, los países desarrollados cedan en sus pretensiones de crecimiento ulterior.

En nuestra época, los esfuerzos por asignar prioridades y recursos dependen, más que nunca, de la situación internacional. Pronto, para la gran mayoría de los países, será imposible trazar un sistema de planeación eficaz, independiente y ajeno a los esfuerzos similares de otros países. De darse el caso, se empezará a observar un fenómeno de planeación regional coordinada a su ámbito más factible, ante la urgencia de la creación de algún acuerdo regional adecuado.

La planeación es, debidamente ejecutada, un instrumento de cambio social y un agente estabilizador del acuerdo político entre los grupos participantes. Actúa dentro de un marco de fuerzas políticas y sociales que dependen, y a la vez alteran, la estructura económica existente. Los resultados deseados, a pesar de la conveniencia de manejarlos en términos cuantitativos, deben extenderse a dimensiones que rebasen el logro de determinada cifra objetivo: hay que esforzarse en que se estimule la participación de los ciudadanos, la iniciativa individual, la acción colectiva, la responsabilidad propia.

Es necesario considerar que la planeación debe intentar alcanzar un ambiente social donde cualquier éxito económico tenga el sentido de un auténtico beneficio compartido, afirme la nacionalidad y estimule el espíritu.

1.2

DEFINICION Y CARACTERISTICAS DEL CONCEPTO DE PLANEACION

Dentro de un contexto teórico un poco más formal que el que ofrece un diccionario común y corriente, se puede decir que Planeación es el proceso que consiste en un análisis documentado, sistemático y tan cuantitativo como sea posible, previo al mejoramiento de determinada situación.

La definición anterior establece que, para cambiar cualquier situación, previamente habrá que conocer la situación actual tan ampliamente como sea factible. No se podrá planear nada si antes no se conoce el estado actual que guarda el problema por resolver.

La Planeación en cuanto a su aplicación, se puede clasificar en **indicativa e imperativa**. La Planeación Indicativa es aquella que se lleva al cabo en los países occidentales, en los cuales se deja actuar libremente la economía de mercado (oferta y demanda), indicando por medio de medidas de tipo fiscal la conveniencia de que los empresarios inviertan en una cierta zona, en cierto sector y en un determinado tiempo. La Planeación Imperativa es la que se emplea en los países socialistas, en los que las actividades productivas se llevan al cabo por total impulso y dirección del Estado. En este caso, el gobierno central es el dueño de

todos los medios de producción y por lo tanto no tiene que pedir opinión del capital, instala factorías y ordena el territorio de acuerdo a directrices centrales.

Por lo que respecta al área de acción, la Planeación puede clasificarse en **global y sectorial**. La Planeación Global, como su nombre lo indica, es aquella que abarca todos los sectores de la economía: agropecuario, industrial y servicios, y necesariamente se contemplará desde un punto de vista macroeconómico. La Planeación Sectorial se ocupa sólo de un sector de la economía, así por ejemplo, se planeará el sector industrial, sin tomar necesariamente en cuenta a los otros dos sectores.

En cuanto al tiempo de planeación, esta puede clasificarse en **corto plazo, mediano plazo, largo plazo y prospectiva**. La primera abarcará periodos menores a 5 años; la segunda, periodos de entre 5 y 10 años; la tercera, periodos de entre 10 y 20 años. La planeación prospectiva o por objetivos, no fijará tiempos sino metas lejanas por alcanzar, donde cada etapa (plan) se irá acercando al prospecto fijado.

Frecuentemente suelen usarse indistintamente los conceptos de **planeación, plan y programa**, existiendo, sin embargo, marcadas diferencias entre ellos: el concepto de planeación involucra la necesidad de cambiar la situación actual por otra supuestamente mejor, y para ello se generan distintas alternativas de solución, las que se evaluarán para conocer sus ventajas y desventajas, y posteriormente implantar la mejor. El plan es el conjunto coherente de políticas, estrategias y metas que constituyen el marco general y reformable de acción; deberá definir las prácticas a seguir y el marco en el que se desarrollarán las actividades. El programa es la ordenación en el tiempo y en el espacio de los acontecimientos.

Una vez definidos los conceptos básicos, se pasa a la parte operativa del proceso de planeación, es decir, los pasos a seguir para poder planear adecuadamente la solución de diversos problemas.

- 1) El conocimiento de la situación que se pretende cambiar.
- 2) La necesidad y el interés por parte de la colectividad de realizar la modificación y su proyección al futuro, lo que implica de hecho la definición de una meta.
- 3) Una proposición que sea la expresión concreta del deseo de la colectividad.
- 4) Un juicio que valore las consecuencias de la proposición.
- 5) Un programa que ordene en el tiempo y en el espacio el desarrollo de los actos necesarios.
- 6) Confrontación de resultados.
- 7) Retroalimentación de las conclusiones y regreso al primer paso.

Todo este proceso de planeación tiene distintas visiones dependiendo de los teóricos que analizan dicho proceso. Por ejemplo, existe un desarrollo teórico de lo que es el modelo de Planeación, con base en el método científico y el de los sistemas (Ochoa, 1983). Dicho desarrollo asocia los métodos con dos tipos de problemas: los relacionados con sistemas no existentes (método de Planeación), y los relacionados con sistemas existentes (método operacional). En cada uno de ellos existe una serie de pasos a seguir como:

- 1) Ubicación del sistema
- 2) Análisis del entorno del nuevo sistema
- 3) Elaboración de diseños alternativos
- 4) Evaluación ex-ante de los sistemas alternativos
- 5) Selección del diseño
- 6) Implantación
- 7) Operación
- 8) Control

Como se puede apreciar, el marco teórico de la Planeación ofrece una gama amplia de conceptos, pero todos ellos enfocados hacia un punto en común, el de desarrollar acciones tendientes a la solución de problemas.

1.3

SISTEMAS

En los párrafos anteriores se ha mencionado la palabra *sistema* dentro de diferentes contextos. Existe una relación sumamente estrecha entre lo que es Planeación y lo que es el concepto de sistema, ya que la Planeación se da dentro de un conjunto de sistemas. Pero, ¿qué es un sistema? Así como en Planeación, no hay un concepto absoluto de sistema, sin embargo, puede decirse que un sistema es la unión de partes o componentes, conectados en una forma organizada y con una finalidad común. Las partes se afectan por estar en el sistema y lo cambian, si se permite. La unión de partes hace *algo*, es decir, muestra una conducta dinámica. Además, un sistema puede existir realmente como un agregado natural de partes encontradas en la naturaleza, o puede ser un agregado inventado por el hombre.

Los elementos de un sistema pueden ser **conceptos**, en cuyo caso se trata de un sistema conceptual, pueden ser **objetos**, o pueden ser **sujetos**. Finalmente, un sistema puede estructurarse de conceptos, objetos y sujetos. Por tanto, un sistema es un agregado de entidades vivientes, no vivientes, o ambas. Un sistema puede componerse de otros sistemas llamados *subsistemas*. En la mayoría de los casos se puede pensar en sistemas más grandes que comprenden otros sistemas, a los que se puede denominar sistemas *totales*, *integrales* o *macrosistemas*.

El problema típico de los sistemas ya existentes es el deseo de mejorarlos, para lo cual se traza un plan. Aquí es donde se entra a la relación existente entre la Planeación y los sistemas. Si el sistema no existe y se ve que es necesaria su creación, se procede a diseñarlo, para lo cual es necesario también un plan. De todo esto se desprende que la **Ingeniería de Sistemas**, es decir, la disciplina que estudia el diseño y el comportamiento de los sistemas, constituye un conjunto de herramientas sumamente útiles para el planeador.

Pero, detengámonos un poco en lo escrito al inicio del párrafo anterior. La mejoría de un sistema significa la transformación o cambio que lo lleva más cerca de la condición de operación adecuada. El concepto de mejoría lleva la connotación de que el diseño del

sistema está definido y que se han establecido normas para su operación. Nótese que la palabra *mejoría* no tiene implicaciones éticas respecto de que el cambio proclamado sea bueno o malo. Se puede "mejorar" la operación de un sindicato del crimen o se puede mejorar la operación de una escuela. La mejoría de los sistemas se refiere al proceso de asegurar que un sistema, o sistemas, operen de acuerdo con las expectativas para las que fueron diseñados. En cuanto al diseño de sistemas, se puede decir que es un proceso creativo que cuestiona las suposiciones en las cuales se han estructurado las formas antiguas. Dicho diseño demanda una apariencia y enfoque totalmente nuevos, a fin de producir soluciones innovadoras con la capacidad de modificar adecuadamente la situación actual de operación del sistema.

1.4

INFORMACION

Algunas personas confunden los términos *datos* e *información*. Se define **información** como datos que se han puesto en un contexto útil y apreciable para un receptor que los usa para tomar decisiones (Burch & Grunditski, 1986). De aquí se desprende que los datos constituyen la materia prima de la información.

La información involucra la comunicación y recepción de inteligencia o conocimiento. Notifica, sorprende y estimula. Revela alternativas adicionales. Ayuda a eliminar alternativas irrelevantes. Influencia a individuos y los motiva para que actúen. En la figura 1.1 se presenta esquemáticamente el ciclo que sigue la información dentro de cualquier organización.

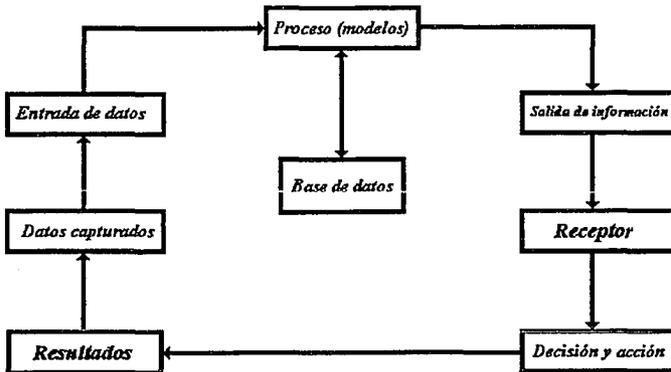


Figura 1.1
Ciclo de la información en una organización

En el siglo XX, la necesidad de producir más información que esté disponible para una mayor cantidad de usuarios, se está incrementando constantemente. Los inversionistas en un negocio necesitan información acerca de su estado financiero y sus prospectos a futuro. Los banqueros y vendedores necesitan información para predecir el comportamiento de un negocio antes de pedir o de otorgar créditos. Como estos existen muchos ejemplos más.

Los avances en la tecnología están transformando rápidamente la fuerza de trabajo, de aquella que requiere largas horas de esfuerzo físico, a la que depende de la información (como productores de información y como usuarios de la misma). Consecuentemente, la necesidad de producir la información necesaria que trate y que maneje tal complejidad, se vuelve más un requerimiento de sobrevivencia que tan sólo una meta deseable para mejorar la eficiencia.

Mucha gente aún equipara la información con reportes de computadora. Algunos otros establecen que los usuarios sufren con grandes cargas de información, y como consecuencia, tienden a sumergirse en un mar contaminado de reportes, de memoranda, de información incorrecta, por tanto, un conjunto importante de usuarios aún adolece de información de calidad. La calidad de la información descansa sólidamente en tres pilares: **exactitud, oportunidad y relevancia**.

Exactitud significa mucho más que uno más uno igual a dos. Significa que la información esté libre de errores e interpretaciones erróneas. Significa que la información sea clara. Significa que la información no esté sesgada. En las organizaciones se descubre que los mandos medios tienen una influencia fuerte sobre las decisiones que se toman a nivel directivo porque aquellos sesgan o desvirtúan la información que se genera en la parte baja de la organización al pasar por sus manos, distorsionando la realidad para obligar que las decisiones que se tomen beneficien a sus propios intereses. Para reducir este efecto, y eventualmente eliminar el sesgo, algunas organizaciones contratan a empresas independientes para producir y diseminar la información directamente a cada nivel de la administración.

El siguiente atributo clave de la calidad de la información es el de conseguir que el receptor obtenga dicha información dentro del marco temporal que le atañe. Es evidente que para el día de hoy, el periódico de ayer no es tan importante; comentarios sobre un hecho después de dos o tres días ya no son atractivos. Oportunidad simplemente significa que el receptor pueda obtener la información justo cuando la necesita.

El tercer atributo de la información de calidad es la relevancia, es decir, ¿la información que se tiene responde específicamente a las preguntas del receptor? Por ejemplo, la ubicación de un barco puede informarse como "va en camino a Gibraltar". Esta información puede ser exacta y oportuna, pero también puede ser irrelevante si el receptor quiere saber si el barco está pasando o no por un cierto puerto intermedio. Una respuesta más apropiada para este receptor puede ser "a las 14:00 horas del 17 de diciembre, el barco se encontraba a 38 grados de latitud norte y a 51 grados de longitud oeste".

Lo que para un receptor es información relevante, puede que para otro receptor no lo sea, inclusive dentro de la misma organización en donde se genera la información. De esta manera se tiene el caso de que la información técnica del uso de una máquina dentro del proceso de producción, no es relevante para el contador de la compañía.

Por todo lo que se ha visto en este capítulo, resulta evidente que una de las herramientas indispensables para la Planeación es la información con que se cuenta en la toma de decisiones. Se dice, y con mucha razón, que no hay malas decisiones, hay información incorrecta. De aquí se desprende que, una decisión tomada puede o no llegar a producir los resultados esperados, pero una decisión tomada bajo bases de información incorrecta siempre llevará a resultados equivocados. Es necesario que el planeador esté completamente seguro de que la información que posee contenga los parámetros de calidad adecuados para su trabajo. En el proceso de la elaboración de un plan de acción para una posterior toma de decisiones, es necesario **gestionar** la obtención de la información. Gestión es el procedimiento a seguir en la consecución de un fin.

Es pues claro que el título del presente capítulo se refiera a la gestión que el planeador debe hacer con el objetivo de obtener información calificada. El término **informática** es un híbrido de dos palabras: *información* y *automática*, es decir, en un contexto general, se refiere a la automatización que puede hacer que la información se encuentre disponible y sea accesible a cualquiera que la requiera y en el momento que la requiera. Así pues, la **Gestión Informática** se refiere al proceso de obtención de la información que el planeador necesita para que su toma de decisiones sea lo más congruente, oportuna y eficiente posible. Para que esto se efectúe de la manera que se desea, es indispensable que exista un **Sistema de Información** del cual emanen los requerimientos del analista. En la sección siguiente se explican más a fondo los contenidos, tanto conceptuales como prácticos, de un sistema de información para que puedan servir de apoyo a la toma de decisiones. Con esto se desea que el planeador se dé cuenta de lo importante que es conocer la información para lograr sus fines.

1.5

SISTEMAS DE INFORMACION

La información de calidad es un recurso muy valioso para todas las organizaciones, sin embargo, la pregunta que surge es ¿qué produce este recurso? Evidentemente la respuesta es: el **sistema de información**.

Las dos áreas principales que definen a un sistema de información son: la construcción de los bloques que constituyen el sistema, y el diseño de las fuerzas que impactan en dicha construcción.

1.5.1

CONSTRUCCION DE BLOQUES

No importa a qué organizaciones sirvan o cómo hayan sido diseñados y desarrollados, todos los sistemas de información están hechos de seis bloques: entrada, modelos, salida, tecnología, bases de datos y controles. Estos bloques pueden tomar distintas formas, valores y variar sus contenidos. Pueden aparecer de manera diferente y trabajar de manera distinta. Algunos soportan sistemas bien diseñados, otros pueden soportar sistemas con un diseño pobre. Algunos pueden ser demasiado burdos y otros muy sofisticados. No importa, estos son los bloques básicos de todos los sistemas de información. El qué tan bien estén interactuando y qué tipo de sistema de información sea el que resulte, es cuestión del diseñador. Entendiendo estos bloques, su relación entre ellos y su contenido lógico y físico, se tienen las bases de conocimiento para describir, diseñar y desarrollar un sistema de información. A continuación se presenta una breve explicación de cada bloque.

BLOQUE DE ENTRADA

La entrada representa la incorporación al sistema de todos los datos, textos, voces e imágenes, y los métodos y medios utilizados para su captura o ingreso. La entrada consiste de transacciones, solicitudes, cuestionamientos, instrucciones y mensajes. Generalmente, las entradas siguen un protocolo y un formato para su contenido, identificación, autorización, presentación y procesamiento. La captura puede hacerse por medio de escritura a mano, formas en papel, reconocimiento de ciertas características como las huellas digitales, teclados, "ratones", voz, sensores de tacto y códigos de caracteres ópticos y magnéticos. Actualmente, los medios más comunes de introducir transacciones y textos son los códigos de barras, lectores láser y teclados. Muchas veces se gana en eficiencia al combinar varios métodos.

BLOQUE DE MODELOS

Este bloque consiste de una combinación de modelos lógicos, matemáticos y/o metodológicos que manipulan los datos que ingresan o que se encuentran ya almacenados, en una variedad de formas para producir los resultados deseados. Un modelo metodológico puede tomar una transacción (entrada) y actualizar un archivo. Un modelo lógico puede combinar ciertos elementos de los datos para proveer una respuesta adecuada a un cuestionamiento, o puede resumir grandes volúmenes de datos en un reporte conciso. Un modelo matemático puede ser tan simple como la relación *utilidad* = *ingresos* - *egresos*, o bien, puede incorporar miles de variables para optimizar una función con programación lineal.

Un modelo puede construirse para simular una actividad o monitorear una operación. Puede contener un gran número de reglas de decisión y tomar decisiones programadas. Algunos modelos simulan inteligencia y proveen consejos expertos a los tomadores de

decisiones en todos los niveles. En esencia, los modelos efectúan tareas transaccionales, realizan y monitorean ciertas operaciones y transforman los datos en información calificada.

BLOQUE DE SALIDA

El producto del sistema de información es la salida, es decir, información calificada y documentos para todos los niveles de la administración y para todos los usuarios dentro y fuera de la organización. A grandes rasgos, la salida es la guía y la influencia de los otros bloques. Si el diseño de este bloque no cubre las necesidades del usuario, entonces los otros bloques tienen poca importancia.

La salida es el otro extremo de la entrada, y claramente se aprecia que no puede ser mejor que la entrada y los modelos usados para producirla. Con frecuencia, entrada y salida son interactivas. La entrada se vuelve salida y viceversa. En un sentido lógico, la salida consiste de cosas tales como estados financieros, facturas, órdenes de pedidos, cheques, presupuestos, respuestas a cuestionamientos, mensajes, comandos, simulación de escenarios, reglas de decisión, etc. La calidad de esta salida se basa en su exactitud, su oportunidad y su relevancia.

BLOQUE TECNOLÓGICO

La tecnología es la caja de herramientas del trabajo de los sistemas de información; captura las entradas, maneja los modelos, almacena y accesa los datos, produce y transmite salidas, y ayuda a controlar el sistema total. El bloque tecnológico consiste de tres componentes principales: técnicos, software y hardware. Los técnicos son las personas que entienden la tecnología y hacen el trabajo, por ejemplo, operadores de computadoras, programadores, especialistas en telecomunicaciones, etc. El software presenta programas que hacen que el hardware trabaje y lo instruye en cómo procesar los modelos. El hardware consiste de una variedad de dispositivos que proveen soporte físico para la construcción de los bloques, por ejemplo: las unidades de despliegue visual sirven como un dispositivo de entrada para transacciones contables; la unidad central de proceso (*CPU*, del inglés: *Central Processing Unit*) maneja los modelos contables con los datos apropiados; las impresoras ubicadas en varias localidades a lo largo de la organización, y que están ligadas al CPU muchas veces por satélites y estaciones terrenas, sacan estados contables; un disco magnético en la base de datos almacena los archivos maestros de contabilidad; y un dispositivo codificador ayuda al control de la confidencialidad de la contabilidad y demás información sensible al tiempo que se transmite y también mientras está almacenada en la base de datos.

La mayoría de los sistemas de información actuales están, y en el futuro seguirán estando, basados en avances tecnológicos. Sin embargo se debe evitar un error muy común que es el encanto excesivo que produce la tecnología, descuidando las necesidades de información de los usuarios. Otro error es el asumir que, adquiriendo e instalando un equipo de cómputo y

la tecnología asociada, es suficiente para tener un sistema de información. Nada puede estar más alejado de la realidad. Una computadora no hace por sí misma un sistema de información. Existen organizaciones que, sin una previsión adecuada, han adquirido equipos de cómputo sumamente caros y han girado instrucciones al personal de la empresa para que los utilicen. No es de extrañarse que muchas computadoras adquiridas bajo estas circunstancias se han quedado solamente para acumular polvo. Por otro lado, sin embargo, existen varios sistemas de información conceptuales que serían todavía conceptos sin el advenimiento de la tecnología. Algunos ejemplos son los dispositivos de entrada conocidos como "puntos de venta" y su interrelación con "equipos de telecomunicaciones"; ambos reducen ciertamente tiempo y espacio.

BLOQUE DE LAS BASES DE DATOS

La base de datos es donde se almacenan todos los datos necesarios para servir a las necesidades de todos los usuarios. Tales bases pueden verse desde dos puntos de vista: *físico y lógico*. La base de datos física está hecha por medios de almacenamiento como cintas magnéticas, discos magnéticos, diskettes, cassettes, tarjetas magnéticas, microcircuitos, microfilms, etc. Esto es el cómo los datos están almacenados realmente, pero otro problema, probablemente aún más importante, es cómo buscarlos datos, cómo asociarlos y cómo recuperarlos para cumplir con los requerimientos de información. Este es el lado lógico de la base de datos que, si se estructura correctamente, asegurará la recuperación oportuna, relevante y exacta de la información. Esto también tiene que ver con el componente de software del sistema e incluye técnicas lógicas de asociación de datos tales como índices, directorios, listas, llaves, apuntadores, rutinas de ordenamiento, redes, árboles y relaciones.

BLOQUE DE CONTROL

Todos los sistemas de información están sujetos a una variedad de peligros y amenazas como los desastres naturales, incendios, fraude, fallas, errores y omisiones, ineficiencias, sabotajes, etc. Sin embargo, en muchas instancias los peores abusos al sistema vienen de procedimientos y manejos inadecuados en la operación, así como de empleados incompetentes. Algunos de los controles que necesitan ser diseñados dentro del sistema para asegurar su protección, integridad y operación eficiente, son la instalación de un sistema de administración de registros o antecedentes del personal involucrado con la información; la implantación de controles tradicionales contables aplicados a la información; el desarrollo de un plan maestro del sistema de información que incluya la prevención de extravío de información, tanto como la creación de un plan de contingencia en caso de pérdidas; la preparación de documentación completa y actualizada; la implantación de monitoreos de hardware y software, así como de sistemas de respaldo de información; la instalación de sistemas de poder ininterrumpibles; el uso de procedimientos adecuados de programación y control; y el diseño procedimientos de seguridad en cuanto al acceso a equipos y programas.

1.5.2

DISEÑO DE FUERZAS

Leonardo da Vinci, el gran pintor, escultor, ingeniero y arquitecto florentino, tuvo el genio y el soporte para crear y diseñar una variedad de artefactos sin ninguna restricción. El no tuvo que satisfacer ningún mercado, ni cumplir con requerimientos de algún usuario, ni preocuparse por costos ni horarios. Tenía el suficiente soporte financiero para seguir cualquier mandato de su creatividad. Muchas de sus creaciones, alguna vez consideradas inútiles, son ahora obras maestras.

La gente que tiene la responsabilidad del diseño y desarrollo de automóviles, puentes, edificios, presas, y miles de etc's. más, no puede darse el lujo de da Vinci de seguir siempre sus propias ideas. A grandes rasgos, ellos están influenciados y restringidos por un número de **fuerzas de diseño**. Para tener éxito, los diseñadores deben determinar cuáles son las fuerzas de diseño y cómo impactan en sus proyectos de diseño, al mismo tiempo que deben incorporar a su trabajo creatividad e innovación, lo cual es algo difícil de hacer. Los diseñadores de sistemas de información deben considerar diez fuerzas que impactan en su trabajo: integración, interfaz usuario/sistema, fuerzas competidoras, calidad y capacidad en el uso de la información, requerimientos del sistema, requerimientos del procesamiento de datos, factores organizacionales, requerimientos de costo/efectividad, factores humanos y requerimientos de factibilidad

INTEGRACION

En términos industriales, los sistemas de información deben diseñarse con uniones cada vez más fuertes entre la oficina y la planta. El sistema de información debe ser tan importante en la fábrica como lo es en las oficinas. La información debe estar integrada para una completa sincronización y coordinación en las operaciones. El sistema no deberá separarse ni funcional ni espacialmente. Este diseño resultará en una red de información dentro de la organización. La mano derecha sabrá lo que la izquierda está haciendo y viceversa.

El desarrollo del área conocida como *CAM* (del inglés: *Computer Aided Manufacturing*), y especialmente los robots programables están provocando mayor integración entre discoño, planeación, establecimiento de itinerarios, contabilidad de costos, control de inventarios y mercadotecnia de la producción en las industrias. Los robots serán cada vez más usados porque (1) incrementan la productividad y la calidad de las salidas; (2) eliminan trabajos tediosos, sucios o peligrosos; (3) tienen la habilidad de explorar y trabajar en ambientes hostiles, por ejemplo, exploraciones submarinas, reparación de satélites, etc.; (4) se beneficiarán del crecimiento económico de la microelectrónica; y (5) gracias a su programabilidad pueden usarse en diversos procesos de manufactura. En verdad, los robots y los sistemas de información trabajan bien estando juntos, y a medida de que los robots van siendo cada vez más inteligentes y realizan más tareas, especialmente en áreas remotas, la necesidad de información integral y mejores ciclos de retroalimentación se incrementa.

INTERFAZ USUARIO/SISTEMA

Tarde o temprano, la información debe fluir por el cerebro humano para que tenga algún valor, de aquí que mientras exista una mejor interacción entre el usuario y el sistema, sin obstrucciones ni interferencias externas, mejor será el flujo de información. La riqueza de la interfaz usuario/sistema dependerá de la fortaleza y variedad de las capacidades de los bloques que constituyen el sistema.

Los esquemas de entrada permitirán al usuario comunicarse con el sistema al través de una combinación de preguntas y respuestas, comandos, menús, cajas de diálogo, etc., todo por medio de los dispositivos de entrada vistos anteriormente. Los modelos ayudarán en las tareas transaccionales, trabajo de oficina, diseño, producción y administración. Los modelos están unidos a una base de datos que sirve más como una base de conocimientos del material fuente. La salida servirá al aspecto sensorial del usuario (vista, oído y tacto). La tecnología reducirá el tiempo y el espacio entre el usuario y el sistema. Los controles proveerán a los usuarios autorizados un sistema confiable y tendrán todo el acceso que necesiten para realizar sus tareas.

FUERZAS COMPETIDORAS

Actualmente las organizaciones están entrando a una era de competencia doméstica y global, un mundo de cambios continuos y significativos que demandan un mejor y más oportuno flujo de información calificada. Para que las organizaciones puedan sobrevivir y prosperar en el mundo del mañana, deben diseñar sistemas que apoyen y mejoren la administración y la productividad.

CALIDAD Y CAPACIDAD DE USO DE LA INFORMACION

Una de las principales fuerzas que afectan al diseño del sistema de información se deriva de los requerimientos específicos de información del usuario. Un usuario puede querer un flujo de efectivo, otro quiere saber las ventas por zona y ventas por cliente para un mes en particular, otro desea el estado de inventario de los productos. Desde el momento en que se puedan identificar los requerimientos individuales de información, es posible proveer información relevante necesaria para satisfacer esos requerimientos. Pero las formas en que los datos se vuelven información son casi tan numerosas como las situaciones específicas que se pueden identificar. El producir información involucra procedimientos tan simples como el dar al receptor los datos en la forma en que acaban de ser capturados, o tan complejos como el desarrollo de modelo matemáticos muy sofisticados. Además, la información tiene que ser oportuna y exacta, por lo que el sistema debe proveer al usuario de información utilizable.

REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Al hablar de los requerimientos del sistema se quiere significar los requerimientos operacionales del sistema de información de manera que produzca información de calidad, los cuales son:

- 1) *Confiabledad*. Se refiere a cómo la utilización de un recurso en iguales procesos sucesivos, arroja los mismos resultados.
- 2) *Disponibilidad*. El sistema debe ser accesible a los usuarios. Un sistema puede ser confiable pero no estar disponible cuando se le está agregando algún componente o está siendo probado. Así mismo, un sistema puede estar disponible pero no ser confiable.
- 3) *Flexibilidad*. Es la habilidad del sistema para cambiar o adaptarse a los cambios de requerimientos del usuario.
- 4) *Programa de instalación*. Engloba el tiempo transcurrido entre que la organización reconoce una necesidad y la implantación de la solución. Presumiblemente, mientras más tiempo se dedique al diseño de un sistema, mejor será dicho diseño, sin embargo, no siempre es así. El recurso del tiempo es, generalmente, limitado.
- 5) *Vida útil y crecimiento potencial*. Algunos sistemas no tienen una expectativa de vida porque ya son obsoletos justo cuando se están apenas implantando, o bien, un sistema puede instalarse y trabajar bien por un tiempo, pero debido a que es un sistema sin la capacidad de crecimiento, se satura cuando el usuario incrementa sus necesidades. De aquí que los sistemas deban diseñarse para cumplir con los requerimientos durante un tiempo razonable (unos cinco años, por ejemplo) y también tener la capacidad de crecer si las necesidades cambian significativamente.
- 6) *Mantenimiento*. Una vez que se implanta un sistema, debe recibir mantenimiento. La pregunta no es si se debe o no dar mantenimiento. Es evidente que sí. El punto es que el sistema debe estar diseñado de tal manera que utilice nombres estándar de datos, lenguajes de programación estándar, programación estructurada y modular, configuraciones estándar y procedimientos estándar de documentación.

REQUERIMIENTOS DEL PROCESAMIENTO DE DATOS

Las necesidades del procesamiento de datos tienen que ver con el trabajo detallado del sistema y están divididas en cuatro categorías:

- 1) *Volumen*. Se refiere a la cantidad de datos que deben ser procesados en un periodo dado para cumplir con la meta de información. Una manera de cuantificar el volumen puede estar en la revisión de las transacciones organizacionales (por ejemplo: tarjetas checadoras de tiempo, facturas, artículos en presupuestos, etc.). Otra medida puede estar en las funciones de procesamiento (por ejemplo: 14 actualizaciones de archivos por registro, 3000 registros maestros, 26 artículos por página).
- 2) *Complejidad*. Se refiere al número de operaciones de datos interrelacionados que deben efectuarse para cumplir con las metas. Por ejemplo, para procesar una nómina correctamente es necesario calcular el pago bruto a cada empleado, su tasa de impuestos, prestaciones, repartos de utilidades, etc.

- 3) *Restricciones de tiempo.* Se definen como la cantidad de tiempo aceptable entre que los datos están disponibles y la información es requerida.
- 4) *Demandas computacionales.* Son una combinación única de volumen, complejidad y restricciones de tiempo para un requerimiento específico de información.

FACTORES ORGANIZACIONALES

Existen cinco factores organizacionales que afectan el tipo de información requerida. Estos factores son:

- a) la naturaleza de la organización,
- b) su tipo o categoría (funcional, sucursal o matriz),
- c) su tamaño,
- d) su estructura,
- e) su estilo de administración (autocrática o democrática, centralizada o descentralizada, etc.).

REQUERIMIENTOS DE COSTO/EFFECTIVIDAD

Cuando usted gasta dinero en una llamada al servicio meteorológico para conocer el estado del tiempo, usted está comprando información. Cuando gasta diez mil nuevos pesos en una enciclopedia, usted no está comprando solamente libros, está comprando información. La información y los sistemas de información son recursos. Se desarrollan con la idea de mejorar la administración, de incrementar la productividad, de ahorrar más dinero para ser competitivos, etc. Los sistemas de información cuestan dinero y a nadie le gusta "gastar pesos para recibir tostones", por lo tanto, es necesario identificar los costos y los beneficios derivados del sistema antes de gastar fondos significativos en su desarrollo. De aquí que sea evidente que la cantidad de dinero disponible para el desarrollo de un sistema de información impacte fuerte y directamente en su diseño.

FACTORES HUMANOS

El área de los factores humanos es expansiva y algunas veces difusa, pero los diseñadores deben tratar de entender y tratar con ella para diseñar sistemas que trabajen con la gente, no en contra de ella, por lo que los sistemas deben ser amigables, naturales y fáciles de usar. Dado que el diseño del ser humano es fijo, el diseño del sistema debe adaptarse a él. El objetivo es diseñar un sistema adaptable a los gustos, disgustos, hábitos, habilidades y tareas del usuario. Los sistemas diseñados teniendo en mente los factores humanos tienen un impacto directo y positivo en la productividad. Es evidente que, a medida que se expande la tecnología computacional y de información, la necesidad de considerar los factores humanos crece.

Un elemento clave que debe considerarse es el diseño ergonómico del sistema de información y el medio ambiente físico de trabajo. Uno de los objetivos principales de la ergonomía, referido al contexto de los factores humanos, es optimizar y hacer compatible la interfaz gente/sistema, una característica crucial de la efectividad del diseño del sistema. Específicamente, a los ergonomistas les interesa la acústica, el clima de la habitación, la iluminación del lugar, los colores de la decoración, el movimiento libre de las piernas, la altura de los asientos, etc. Su propósito es reducir dolores, fatiga excesiva y el stress de las personas que trabajan, por ejemplo, frente a una pantalla de computadora.

Además de la aplicación de la ergonomía, pueden tomarse las siguientes acciones para mejorar los aspectos físicos y psicológicos del sistema:

- 1) *Áreas alternativas.* Divida el lugar de trabajo en dos áreas: una de trabajo, ergonómicamente diseñada para que la gente se pueda concentrar y hacer su trabajo, y otra de relajamiento, donde la gente pueda convivir por algunos momentos, intercambie ideas, haga bromas, en pocas palabras, que se relaje.
- 2) *Grupos de trabajo.* Aquellas personas que trabajan en diferentes departamentos tales como ventas, contabilidad, personal o envíos, requieren de la misma información. El sistema de información debe diseñarse para que estén prácticamente juntos y se favorezca la apertura, la colaboración y compartir el trabajo.
- 3) *Especificación del usuario.* Algunos diseñadores de sistemas que tratan de diseñar un sistema que satisfaga a todos los usuarios potenciales, terminan creando un sistema que no satisface a nadie en particular. Es necesario tomar en cuenta las necesidades de cada usuario, pero teniendo la creatividad suficiente para elaborar un sistema lo suficientemente general.
- 4) *Presentación y respuesta.* La gente trabaja mejor con representaciones mezcladas, de modo que, donde sea posible, debe usarse una combinación de formas, textos, gráficas, video y sonido. Para mejorar la presentación, utilice distintos colores para diferentes categorías de información, iconos para indicar ubicaciones o tipos y variación en la intensidad de los colores para remarcar elementos importantes.
- 5) *Demandas psicológicas de trabajo.* La gente debe estar orgullosa de su trabajo. Para aquellos que aspiran a más, deben existir oportunidades para recompensar su esfuerzo. El sistema debe reubicar a aquellos que gustan del trabajo rutinario. Es más, se debe dar autonomía a los empleados de manera que ellos puedan tomar sus propias decisiones acerca de su trabajo.
- 6) *Centro de información.* Es importante instalar un centro de fuentes de información en donde existan computadoras que puedan ser aprovechadas por los usuarios y que manejen el sistema para que puedan desenvolverse en su trabajo.

REQUERIMIENTOS DE FACTIBILIDAD

El acrónimo TELOT (adaptado del inglés *TELOS* que representa *Technical, Economic, Legal, Operational, Schedule*, esta última sin traducción adecuada al acrónimo), representa los cinco componentes de los requerimientos de factibilidad:

- 1) *Factibilidad Técnica.* El diseñador determina si su diseño preliminar puede desarrollarse e implantarse utilizando la tecnología existente. Usualmente, esta determinación incluye al experto tecnológico que existe dentro de la organización, pero puede también incluir asesoría técnica externa. Como regla general, la tecnología está muy adelante de la habilidad de las personas para aplicarla en forma efectiva, por lo que, en la mayoría de los casos, la factibilidad técnica, desde el punto de vista de la disponibilidad, no es tan relevante, sin embargo, dado que es la liga de los demás bloques del sistema, el nivel de acceso a la tecnología tiene un impacto considerable en el diseño del sistema.
- 2) *Factibilidad Económica.* Esta área genera una pregunta básica: ¿Tiene la organización los fondos necesarios para desarrollar e implantar un sistema de información, dados los requerimientos de capital de otros proyectos dentro de ella? Si así fuera, ¿cuál sería el compromiso financiero que habría que tener? Es claro que el nivel de diseño está directamente relacionado con el apoyo económico.
- 3) *Factibilidad Legal.* Este factor obliga a que no existan conflictos entre el sistema bajo consideración y la habilidad de la organización para descargar obligaciones legales. En este aspecto, el analista debe considerar las implicaciones legales que surgen de los reglamentos y normas de las diferentes instancias legislativas dentro del contexto del sistema que está diseñando.
- 4) *Factibilidad Operacional.* ¿La operación del sistema se basará en el medio ambiente de la organización? ¿en los procedimientos existentes? ¿en el personal existente? De no ser así, ¿es posible la adquisición de conocimientos, de habilidades, de entrenamiento y otros cambios para operarlo? Si la respuesta es no, el diseño del sistema debe ser modificado de manera que se adapte a las condiciones existentes de operación.
- 5) *Factibilidad Temporal.* Esto significa que el diseño del sistema debe poder volverse operativo dentro de un marco razonable de tiempo. Si no es así, o el diseño, o bien el marco de tiempo deben ser modificados.

2. LA PERCEPCION REMOTA

2.1

INTRODUCCION

Puede decirse que la percepción remota es tanto una ciencia como un arte desarrollados para obtener información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por un medio que no está en contacto con dicho objeto, área o fenómeno que se desea investigar. De hecho, al estar leyendo estas líneas se está utilizando percepción remota, en cuyo caso los ojos están sirviendo como sensores que responden a la luz reflejada por la página. En esencia, los datos recibidos por los ojos son impulsos correspondientes a áreas de la página que varían de lo claro a lo oscuro; estos datos son enviados al computador cerebral que los analiza o interpreta, de tal forma que es posible reconocer palabras de las áreas oscuras, que las palabras forman frases, y que las frases arrojan un marco lógico de información.

Los datos colectados en forma remota suelen ser de tres formas principales, distribución de campos de fuerzas (algunas gravitacionales), distribuciones de ondas acústicas o distribuciones de energía electromagnética. Este trabajo se basa en sensores electromagnéticos operados desde alguna plataforma espacial que adquiere los datos a partir de alguna de las formas en que la Tierra refleja dicha energía electromagnética. Posteriormente esos datos son procesados y analizados al través de algún sistema de cómputo que permita interpretar la información acerca de los recursos que se están investigando (Lillesand, 1979).

La figura 2.1 muestra el proceso de percepción remota de manera generalizada, para analizar los recursos terrestres. Puede notarse que existen dos procesos básicos, el de adquisición de datos y el de análisis de los mismos. En la parte (a) de la figura puede observarse el proceso físico de la obtención de la imagen; tomando al Sol como fuente de energía, su luz se propaga al través de la atmósfera llegando a la tierra donde parte de ella es absorbida y parte reflejada. En la parte (b) se muestra el hecho de la adquisición de la imagen por medio de aeronaves o satélites obteniéndose un producto inicial que puede estar

en forma de imagen en sí, o bien en forma numérica (digitizada). El siguiente paso es el que involucra los procesos de interpretación, lo cual conlleva a un producto final que puede estar en forma de mapas, tablas o reportes escritos para una posterior discusión de los usuarios.

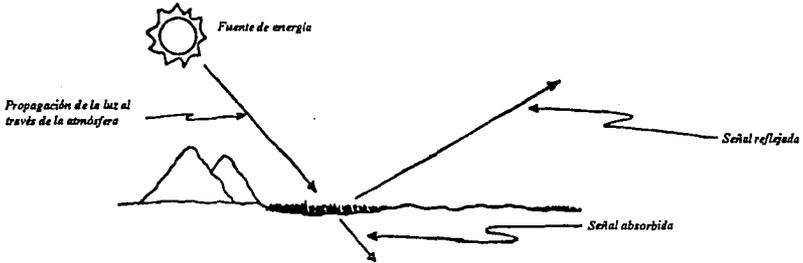


Figura 2.1 (a)
Proceso físico de la obtención de una imagen

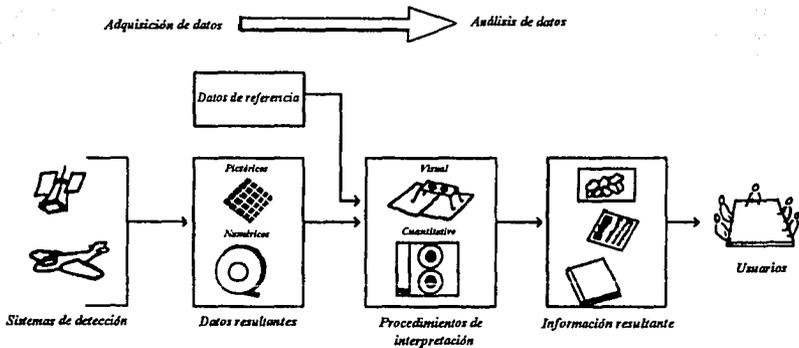


Figura 2.1 (b)
Proceso completo de la adquisición de información por medio de Percepción Remota

2.2

BOSQUEJO HISTORICO

Si a la ciencia de la percepción remota se le asocia tanto con obtención de registros como de observaciones, es posible decir que la era de la percepción remota nace con la invención de la fotografía en 1826. Es cierto que los telescopios fueron inventados mucho antes del siglo XIX, pero es sólo hasta la primera mitad de ese siglo que existe la posibilidad de registrar permanentemente de alguna manera las observaciones que el hombre hace a su medio ambiente por medios artificiales. El potencial de la fotografía es rápidamente apreciado especialmente para registrar escenas de especial significado para el observador. Se inventan nuevas cámaras y tipos de películas permitiendo al hombre extender su campo de visión más allá del pequeño espectro de luz visible. El ansia de búsqueda en nuevos campos como el espectro de radiaciones hace que la investigación se centre en el análisis de energías acústicas, químicas, gravitatorias y radioactivas, todo esto estimulado militarmente por las dos Guerras Mundiales, sobre todo la segunda.

Es en 1960 que se hace referencia por primera vez con el nombre de percepción remota a un campo muy específico de estudio. A partir de entonces ha sido un punto de despegue con mucho impulso aportado por la era espacial y la carrera interplanetaria de los Estados Unidos con la Unión Soviética. En particular, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio. (*NASA*, del inglés: *National Aeronautic and Space Administration*) ha jugado un papel muy importante en lo que se refiere a la accesibilidad de la información proporcionada por sensores remotos, principalmente colocados en satélites.

La percepción remota espacial comienza en el período de 1946 a 1950 cuando pequeñas cámaras eran montadas en cohetes V-2 que sobrevolaban las áreas de pruebas militares en Nuevo México. Sin embargo, las fotografías logradas por ese medio eran de una calidad muy baja principalmente porque esas misiones no habían sido diseñadas para fines fotogramétricos (todo el punto 2.2: Barrett, 1982; ASP, 1983 y Green, 1983).

Los esfuerzos iniciales que apuntaron a la captación de imágenes de la superficie de la Tierra desde el espacio fueron invenciones incidentales gracias al crecimiento de la tecnología dedicada al desarrollo de satélites meteorológicos. Comenzando con el *TIROS-1* (del inglés: *Television and InfraRed Observation Satellite*, Satélite de Observación de Televisión e Infrarrojo) en 1960, los satélites que precedían el tiempo enviaban imágenes muy burdas de patrones de nubes y virtualmente vistas indescifrables de la superficie terrestre. Con el refinamiento de los sensores remotos a bordo de los satélites meteorológicos, las imágenes de las características tanto atmosféricas como terrestres se vuelven mucho más claras. Eventualmente, los meteorólogos empezaron estudios intensivos de áreas terrestres para coleccionar datos de agua, nieve y hielo.

Los programas de *NASA* de los 60's dan una gran proyección a la percepción remota al través de los proyectos *MERCURY*, *GEMINIS* y *APOLLO*. El 5 de Mayo de 1961, Alan B. Shepard, Jr. realiza un vuelo suborbital a bordo de una nave Mercury durante 15 minutos en el que son tomadas 150 excelentes fotografías con una cámara Mauer de 70 mm. Una cámara Hasselblad especialmente modificada con lente de 80 mm es adoptada por todos los

proyectos Géminis, particularmente por el programa GT-4 el cual incluye el primer experimento formal de fotografía desde el espacio específicamente dirigido a estudios geológicos. La cobertura logra construir un mosaico de fotografías sobrepuestas del suroeste de los Estados Unidos, norte de México y otras áreas de Norteamérica, África y Asia. Dichas imágenes conllevan a nuevos descubrimientos tectónicos, vulcanológicos y geomorfológicos.

Después del éxito del programa Géminis, misiones subsecuentes incluyen una serie de experimentos similares enfocados a investigar varios fenómenos geográficos y oceanográficos. Una vez terminadas las misiones se encuentra que se tienen alrededor de 1,100 fotografías en color de alta calidad de la superficie de la Tierra. Es entonces cuando surge la idea fija de tener un inventario sistemático y repetitivo del globo.

En la segunda mitad de la década de los 60 la serie de satélites *SURVEYOR* es diseñada para evaluar sitios de posibles alunizajes para misiones tripuladas posteriores (Apollo). El Surveyor 7 envía a la Tierra 21,038 imágenes de televisión desde su sitio de alunizaje. Muchas de ellas son procesadas por computador en un intento por mejorar el conocimiento de la composición y estructura de la superficie de la Luna.

El *MARINER 4*, lanzado en 1964 envía 22 imágenes de Marte que toma durante su paso por el planeta. Esta es la primer misión espacial en utilizar un sistema de imágenes totalmente digital. La nave manda los datos a una velocidad aproximada de 8 bits por segundo. La posterior misión Mariner 9 (1971), es la primera en poner un satélite en la órbita de otro planeta, enviando a la Tierra 7,000 imágenes de Marte que son después utilizadas para construir mapas de todo el planeta, por primera vez en la historia.

Las actividades de percepción remota de otros planetas de *NASA* continúan con el lanzamiento de las misiones *VIKING 1* y *2* al planeta Marte a partir de 1975, las cuales remiten a la Tierra un total aproximado de 100,000 imágenes. Es interesante hacer notar que una sola imagen enviada por Viking contiene tantos bits de información como la suma de todos los bits de todas las imágenes enviadas por el Mariner 4.

Dos naves *VOYAGER* son lanzadas en 1977 en trayectorias diseñadas para pasar por Júpiter y Saturno (y sus satélites) lo más cerca posible, durante 1979, 80 y 81. El proceso digital de imágenes por computador es utilizado para obtener el primer acercamiento a color de los dos planetas, y juega un papel preponderante en el descubrimiento del nuevo satélite joviano, al igual que descubrir un anillo alrededor de Júpiter y analizar la compleja estructura de los anillos de Saturno. Dicho proceso digital permite realizar una secuencia de fotografías que dan movimiento a las características atmosféricas de Júpiter.

Ahora bien, en lo concerniente a sistemas orbitales terrestres, la serie de satélites conocidos actualmente como *LANDSAT*, evocaron conceptualmente las observaciones fotográficas de los vuelos orbitales de Mercury y Géminis. Los datos obtenidos en estos vuelos tripulados, dieron una idea de lo práctico que resultaba el observar a la Tierra desde una órbita espacial, lo que ahora se conoce como *observación de recursos terrestres*. Estas

observaciones y las ideas que siguieron, llevaron a la NASA a desarrollar un programa de satélites originalmente conocido como *ERTS-1* (del inglés: *Earth Resources Technology Satellite-1*, Satélite Tecnológico de Recursos Terrestres), posteriormente llamado *LANDSAT 1*, cuyo lanzamiento ocurre el 23 de julio de 1972. Las imágenes tomadas por *Landsat* han sido puestas disponibles al público durante muchos años. Algunos países han instalado sus propias estaciones telemétricas de recepción para procesar imágenes *Landsat*. *Landsat 1* es retirado en 1978. *Landsat 2* se lanza en 1975 y *Landsat 3* en 1978. *Landsat 2* es desactivado en 1979 vuelto a activar en junio de 1980 después de múltiples problemas de operación de *Landsat 3*.

NASA también opera el satélite *SEASAT* a finales de los 70, adquiriendo imágenes de radar de alta resolución y apertura sintética durante 90 días de periodo operacional. Otras variedades de sistemas de sensores remotos han sido usados para distintos propósitos, como el utilizado por la Misión de Mapeo de la Capacidad de Calor (*HCMM*, del inglés: *Heat Capacity Mapping Mission*) la cual envía datos, en formato de imágenes, para elaborar un mapa de la capacidad de calor de la Tierra.

Una serie de naves diseñadas para ayudar en el análisis del tiempo y clima terrestre han estado operando desde mediados de los 70's. Las naves *TIROS* y *NIMBUS* portan una gran variedad de sensores, incluyendo sistemas de imágenes e instrumentos espectrales. De manera similar, la serie *GOES* (del inglés: *Geostationary Operational Environmental Satellite*, Satélite Operacional Geoestacionario de Medio Ambiente) de satélites síncronos (que giran a la misma velocidad que la Tierra y por lo tanto aparecen "estacionados" en algún punto orbital) proveen imágenes frecuentemente usadas en forma rutinaria para predicción del tiempo, análisis climático y medición del movimiento de las nubes.

En la segunda mitad de la década de los 80's se lanza el primero de una serie de satélites franceses para la observación de la Tierra. Estos satélites llamados *SPOT* son actualmente una fuente muy importante de imágenes de percepción remota por su alta resolución tanto espacial como radiométrica. Se detallan en mayor medida estos satélites en el subcapítulo 2.6.

El satélite europeo de percepción remota *ERS-1* pertenece a una nueva generación de satélites planeados para la década de los 90. Este satélite está financiado tanto por la Agencia Espacial Europea, *ESA* (del inglés: *European Spatial Agency*) como por tres instituciones independientes (Boletín bimestral SELPER número 6, septiembre 1991). Los objetivos principales de esta misión son la vigilancia de los océanos y la capa de hielo, lo que proporciona datos esenciales para:

- a) representación mejorada de las interacciones océano-atmósfera en los modelos climáticos,
- b) avances mayores en el conocimiento de circulación de los océanos y las transferencias de energía,
- c) estimaciones más confiables del balance de masa de las capas de hielo del Ártico y el Antártico,

- d) mejor monitoreo de procesos de envenenamiento ambiental y procesos de dinámica costera, y
- e) detección y administración mejorada del cambio de uso del suelo.

Evidentemente existen los satélites militares que envían información en forma de imágenes, las que son procesadas por computador para aplicaciones puramente militares, y de los cuales no existen datos disponibles por razones obvias.

2.3

PLATAFORMAS ESPACIALES: CONCEPTOS ORBITALES

Para proveer un panorama general de las relaciones regionales, las plataformas espaciales pueden ponerse en órbita de tal manera que puedan cubrir repetidamente toda la superficie de la Tierra. El intervalo de tiempo entre dos tomas consecutivas de la misma región puede establecerse de alguna manera escogiendo una órbita apropiada. Es más, tales órbitas pueden estar tan bien definidas que pueden hacerse observaciones del mismo lugar bajo condiciones idénticas o comparables de iluminación a lo largo de largos períodos de tiempo.

Las relaciones orbitales de los satélites están afectadas por muchos factores pero es posible darse cuenta que existe una relación principal entre la altura del satélite y su vida antes de reingresar a la atmósfera terrestre. Los satélites en órbitas bajas están mucho más afectados por los cambios atmosféricos y la atracción gravitacional que los enviados a órbitas altas (Barrett, 1982). En la tabla 2.1 se aprecia la relación entre la altitud de la órbita y la vida del satélite antes de entrar nuevamente a la Tierra.

<i>Altitud de la Órbita (en kms.)</i>	<i>Tiempo antes del reingreso</i>
250	12 días
500	10 años
600	50 años
1,000	1,000 años
10,000	Indefinido

Fuente: Barrett y Curtis, 1982

Tabla 2.1

Dado lo anterior, existe una altitud mínima a la cual colocar un satélite para que su periodo de operación sea rentable, esta altitud se encuentra a los 450 kms. para que el satélite opere de 1 a 5 años por lo menos. La órbita real de los satélites de percepción remota no tripulados se encuentra entre los 800 y los 1,500 kms., aunque algunos operan

hasta 30,000 kms. de altitud. Los del primer grupo tienen órbitas polares o cercanas a los polos, son llamados *síncronos solares* porque cruzan el Ecuador a la misma hora cada día. Los del segundo grupo son en su mayoría geoestacionarios (tienen el mismo período de rotación que la Tierra y aparecen como suspendidos en un punto fijo seleccionado previamente).

Aunque todas las órbitas de los satélites son elípticas algunas veces es deseable, por motivos de observación, que la órbita sea casi circular, por ejemplo, el satélite norteamericano *NOAA-6* (del inglés: *National Oceanic and Atmospheric Administration* Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) tenía un apogeo (punto más alejado de la Tierra) de 826 kms. y un perigeo (punto más cercano a la Tierra) de 810 kms., en contraposición del satélite soviético *COSMOS-1109* que tenía un apogeo de 40,058 kms. y un perigeo de sólo 613 kms. Este tipo de órbitas se prefieren cuando los satélites tienen distintas misiones de observación en una región de la Tierra que en otra (ASP, 1983).

Los satélites de observación de órbitas bajas están catalogados en tres grupos: los que tienen órbita ecuatorial, los que tienen órbita polar y los que tienen órbita oblicua (casi polar), estos últimos pueden estar girando en dirección del movimiento de rotación de la Tierra (E-W), o en sentido inverso (W-E) -también llamados *retrógrados*-. La inclinación de la órbita está especificada en términos del ángulo entre el plano de ascenso del satélite y el Ecuador. Dado que la Tierra no es una esfera, ejerce una influencia de giroscopio sobre los satélites de órbita oblicua, esto es, actúa como aceleradora cuando el satélite gira en sentido de la rotación, o bien frena al satélite cuando este es retrógrado. Tal efecto también es causado por el Sol sobre la Tierra (ya que esta actúa a su vez como satélite del Sol), y lógicamente sobre el satélite.

El excelente escritor de ciencia-ficción Sir Arthur C. Clarke, escribió en su novela *2001: Una Odisea Espacial* que existe una órbita tal que su aceleración pueda ser sincronizada con aquella sufrida por la Tierra alrededor del Sol, a esta órbita oblicua retrógrada se le llama *síncrona solar* y asegura que el satélite tendrá una vista de un punto específico de la superficie terrestre a la misma hora local a intervalos predeterminados; así que la altitud del Sol en el cielo es aproximadamente la misma en la misma estación cada vez que pasa por el mismo paralelo terrestre. Es en este contexto que la observación de la superficie desde un satélite debe ser vista como una función no sólo de la altitud y de la configuración orbital, sino también del llamado *campo instantáneo de visión (IFOV*, del inglés: *Instant Field Of Vision*) del sistema de sensores del satélite. Más adelante se retomarán estas ideas para presentar una visión global de los satélites Landsat y SPOT, parte fundamental de este trabajo.

2.4

LA FÍSICA DE LA PERCEPCIÓN REMOTA

2.4.1

FUENTES DE ENERGÍA
Y PRINCIPIOS DE RADIACIÓN

La luz visible es sólo una de muchas formas de energía electromagnética. Otras formas familiares son las ondas de radio, el calor, los rayos ultravioleta y los rayos X . La teoría de ondas estudia el comportamiento de tales radiaciones. La figura 2.2 muestra una onda electromagnética viajando en forma armónica y senoidal a la velocidad de la luz, c . La distancia entre dos picos superiores o inferiores de una onda se le llama **longitud de onda**, y está representada por λ , y al número de picos que pasan por un punto fijo en una unidad de tiempo se le llama **frecuencia** (f). Las ondas obedecen la ecuación general

$$c = f\lambda \quad (2.1)$$

c es, en el vacío, una constante (3×10^8 m/s), mientras que en otros medios $c \rightarrow v$ donde también $v = f\lambda$. Tanto la frecuencia como la longitud de cualquier tipo de onda están relacionadas inversamente, y cada una de ellas caracteriza explícitamente un cierto tipo de onda. En percepción remota lo normal es caracterizar las ondas electromagnéticas por su posición dentro del **espectro electromagnético** (figura 2.3). La unidad usada para medir las longitudes de onda a lo largo del espectro es la micra (μm). Una micra equivale a 10^{-6} metros.

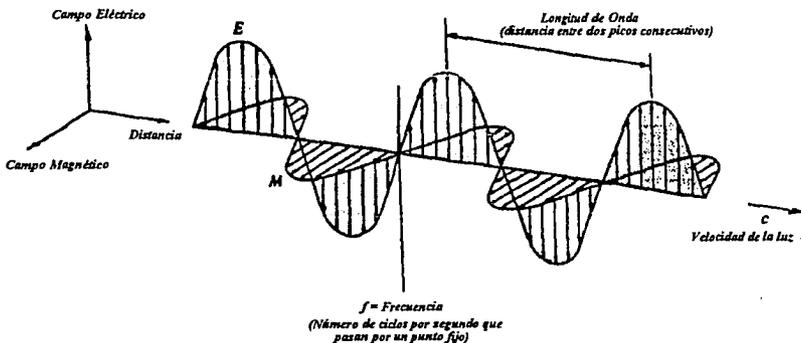


Figura 2.2
Onda electromagnética y sus componentes

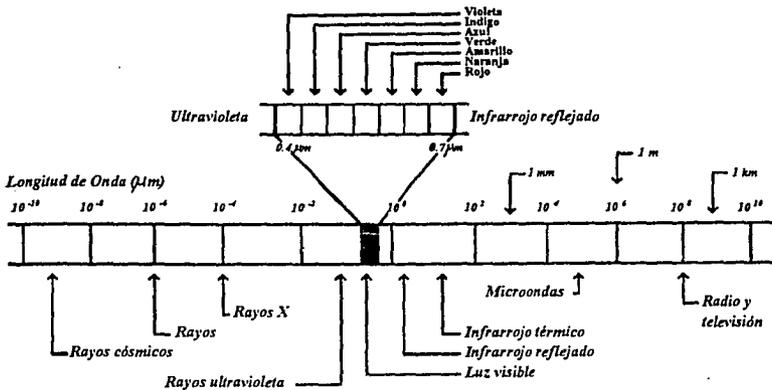


Figura 2.3
Espectro electromagnético

Aunque a las bandas del espectro se les asigna generalmente un nombre (por conveniencia), no existe una frontera bien definida entre dichas regiones; también debe notarse que el espectro electromagnético es continuo y está dividido, simplemente por comodidad, en cambios de magnitud en potencias de 10, por eso es común el uso de gráficas logarítmicas para representarlo. La parte "visible" del espectro es extremadamente pequeña dado que la sensibilidad espectral del ojo humano se extiende solamente desde alrededor de $0.4 \mu\text{m}$ hasta cerca de $0.7 \mu\text{m}$. De los colores primarios, el azul se encuentra en el rango aproximado de 0.4 a $0.5 \mu\text{m}$, el verde de 0.5 a $0.6 \mu\text{m}$ y el rojo de 0.6 a $0.7 \mu\text{m}$. La región ultravioleta se extiende hacia la parte corta del espectro y la infrarroja (tanto reflejada como térmica) hacia la parte larga del mismo. Hacia la parte larga se encuentran las microondas (de 1 mm hasta 1 m).

La mayoría de los sistemas de percepción operan en una o varias bandas del espectro: la visible, la infrarroja reflejada, la infrarroja térmica y las microondas.

Aunque muchas características de la radiación electromagnética están descritas por la teoría de ondas, otra teoría ofrece una visión útil de cómo la energía electromagnética interactúa con la materia. Esta teoría de partículas sugiere que la radiación electromagnética está compuesta por unidades discretas llamadas fotones o quantum. La energía de un quantum está dada por

$$E = hf \quad (2.2)$$

donde E = energía del quantum en Joules (J)
 h = constante de Planck, 6.626×10^{-34} $J \cdot \text{seg}$

Se pueden relacionar los modelos de onda y cuánticos despejando f de (2.1) y sustituyendo en (2.2) para obtener

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

De aquí se desprende que la energía de un quantum es inversamente proporcional a su longitud de onda, *i.e.*, mientras mayor sea la longitud de onda de la partícula, menor es la energía que contiene. Esto tiene importantes implicaciones en percepción remota desde el momento en que las radiaciones de gran longitud de onda que se emiten naturalmente no son tan fáciles de captar por los sensores que las radiaciones de pequeña longitud de onda como la energía infrarroja térmica. La baja energía contenida en radiaciones de longitud de onda larga hace que, en general, los sistemas que operan a dicha longitud de onda deben abarcar grandes áreas de la Tierra en un tiempo dado para obtener una señal detectable de energía, o bien, medir en tiempos muy largos, ya que el período es el inverso de la frecuencia ($f=1/T$).

El Sol es la fuente de radiación electromagnética más evidente para percepción remota. Sin embargo, toda la materia a temperaturas por encima del cero absoluto (0°K ó -273°C) emiten ese tipo de radiación continuamente. De tal forma que los objetos terrestres son también fuentes de radiación aunque sea de magnitud considerablemente diferente y composición espectral que la del Sol. La cantidad de energía que un objeto irradia está en función de, entre otras cosas, la temperatura superficial del objeto, propiedad expresada por la Ley de Stefan-Boltzmann, dada por

$$W = \sigma T^4 \quad (2.4)$$

donde W = emisión total de radiación de la superficie de un material, en Watts/m^2
 σ = constante de Stefan-Boltzmann, 5.6697×10^{-8} $\text{Watts}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}^4$
 T = temperatura absoluta del material en $^\circ\text{K}$

de esta expresión lo importante está en el hecho que la energía total emitida por un objeto varía en términos de T^4 , lo que quiere decir que se incrementa muy rápido con el incremento de temperatura del objeto. También debe notarse que esta ley está expresada para una fuente de energía que se comporta como un **cuerpo negro**, esto es, un cuerpo hipotético e ideal que transforma la energía calorífica en la máxima energía radiante posible que permiten las leyes de la Termodinámica. Este concepto es útil dado que establece la máxima conversión posible cuando la energía emitida se debe a la conversión de energía calorífica. Los objetos reales sólo se aproximan a este ideal.

Así como la energía total emitida por un objeto varía con la temperatura, la distribución espectral de la energía emitida también varía. La figura 2.4 muestra curvas de distribución de energía de objetos negros en los que la temperatura varía de 200°K a 6000°K; las unidades del eje vertical ($Watts \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$) expresan el poder de radiación que emana de un cuerpo negro por cada intervalo espectral de $1 \mu m$. De aquí que el área bajo dichas curvas es igual al total de radiación emitida. Mientras más alta es la temperatura del radiador mayor es la cantidad total de energía que emite. Las curvas también muestran que existe una tendencia hacia menores longitudes de onda en la parte más alta de la curva conforme la temperatura aumenta. La longitud de onda dominante, esto es, aquella a la cual la curva alcanza su máximo, está relacionada con su temperatura al través de la Ley de Desplazamiento de Wien,

$$\lambda_m = \frac{A}{T} \tag{2.5}$$

donde λ_m = longitud de onda de la mayor emisión espectral de radiación

$A = 2,898 \mu m \cdot K$

T = temperatura en °K

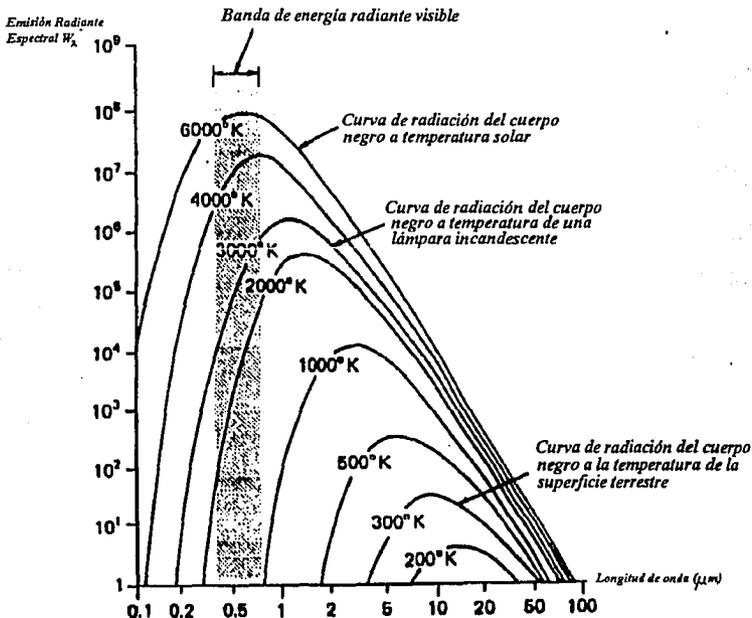


Figura 2.4
Energía emitida por un cuerpo negro a diferentes temperaturas

Así pues, para un cuerpo negro la longitud de onda a la cual ocurre la emisión de radiación máxima espectral varía inversamente con la temperatura absoluta del cuerpo. Se observa este fenómeno cuando un cuerpo metálico se calienta; a medida que el objeto se vuelve más caliente, comienza a brillar y su color cambia sucesivamente hacia longitudes de onda más cortas (del rojo, al naranja, y eventualmente al amarillo).

La temperatura ambiente de la Tierra se encuentra alrededor de los 300°K (27°C). De la Ley de Wien esto significa que la máxima emisión de radiación espectral de la Tierra ocurre a una longitud de onda de aproximadamente 9.7 μm . Debido a que esta radiación está relacionada con el calor terrestre, se le conoce como **energía infrarroja térmica**. Esta energía no puede ser vista ni fotografiada, pero puede captarse al través de sensores equipados con dispositivos térmicos. En comparación, el Sol tiene un máximo de energía mucho más alto que ocurre a las 0.5 μm . Nuestros ojos -y las películas fotográficas- son sensibles a la energía de esta magnitud y longitud de onda; así, cuando el Sol está presente podemos observar las características de la Tierra gracias a la energía solar reflejada. Una vez más, la energía de la longitud de onda más larga emitida por las características ambientales de la Tierra puede ser observada solamente mediante un sistema de sensores no fotográfico. La línea divisoria entre las longitudes de onda infrarrojas reflejadas y emitidas está aproximadamente en las 3 μm . Debajo de esa longitud la energía reflejada predomina; encima de ella prevalece la energía emitida (Lillesand, 1986).

Ciertos sensores como los sistemas de radar, cuentan con sus propias fuentes de energía para iluminar los objetos de interés. Estos sistemas son denominados **activos** en contraste con los sistemas **pasivos** que captan la energía disponible naturalmente. Un ejemplo muy común de un sistema activo es una cámara utilizada con flash. La misma cámara usada con luz solar se vuelve un sistema pasivo.

2.4.2 INTERACCIONES DE LA ENERGIA CON LAS CARACTERISTICAS DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

Cuando la energía electromagnética incide sobre cualquier parte de la superficie terrestre, se hacen posibles dos interacciones fundamentales de la energía con dicha superficie. Esto se ilustra en la figura 2.5 para un elemento de volumen de un cuerpo de agua. Varias fracciones de la energía incidente en el elemento son reflejadas y absorbidas. Aplicando el principio de conservación de la energía, podemos establecer la interrelación entre dichas interacciones como

$$E_i(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) \quad (2.6)$$

donde E_I denota la energía de incidencia, E_R denota la energía reflejada y E_A denota la energía absorbida, con todas las componentes de la energía en función de la longitud de onda λ . La ecuación 2.6 es una ecuación de balance de energía que expresa la interrelación entre los mecanismos de incidencia, reflexión y absorción.

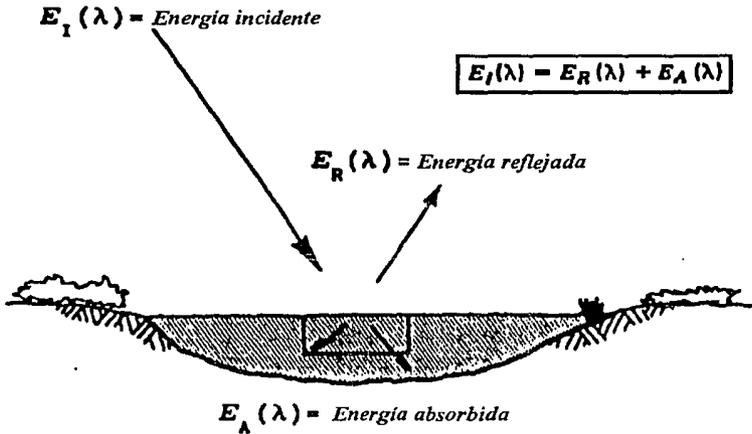


Figura 2.5
Interacciones de energía incidente sobre un cuerpo de agua

Deben notarse dos puntos concernientes a esta relación. Primero, las proporciones de energía reflejada y absorbida variarán para diferentes características de la Tierra, dependiendo de sus condiciones y su tipo de material. Estas diferencias nos permiten distinguir distintos rasgos en una imagen. Segundo, la dependencia con la longitud de onda significa que aún dentro de un mismo tipo de rasgo terrestre dado, la proporción de energía reflejada y absorbida variará a diferentes longitudes de onda. Así, dos rasgos terrestres pueden ser indistinguibles en un rango espectral y ser mucho muy diferentes en otra banda. Dentro de la porción visible del espectro estas variaciones espectrales resultan en el efecto visual llamado color. Por ejemplo, decimos que un objeto es azul cuando refleja altamente energía en la porción azul del espectro. Así, el ojo utiliza variaciones espectrales en la magnitud de la energía reflejada para distinguir entre varios objetos.

Dado que muchos sistemas de sensores remotos operan en regiones de longitud de onda en las que predomina la energía reflejada, las propiedades de reflectancia de las características terrestres son muy importantes. De aquí que sea útil pensar en la relación de balance de energía de (2.6) expresada en la siguiente forma:

$$E_R(\lambda) = E_I(\lambda) - E_A(\lambda) \quad (2.7)$$

esto es, la energía reflejada es igual a la energía de incidencia en cierta zona, reducida por la energía absorbida por ella.

La forma geométrica en la cual un objeto refleja la energía tiene también gran consideración. Este factor es primeramente una función de la rugosidad de la superficie del objeto. Se llaman reflectores especulares a las superficies planas que se comportan como espejos, esto es, donde el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia. Los reflectores difusos son superficies rugosas que reflejan uniformemente hacia todas direcciones. La mayoría de las superficies terrestres no son ni perfectamente especulares ni difusas; su característica está de alguna manera entre ambos extremos. La figura 2.6 muestra el carácter geométrico de las diferentes superficies. La categoría que caracteriza dichas superficies depende de la rugosidad comparada con la longitud de onda de la energía que incide en ellas. Por ejemplo, en el rango de las ondas de radio -relativamente largas- el terreno rocoso puede aparecer como suave respecto a la energía que incide sobre él. En comparación, en la parte visible del espectro, aún un material como la arena fina aparece rugoso. En pocas palabras, cuando la longitud de onda de la energía incidente es mucho más pequeña que las partículas que componen la superficie en cuestión, dicha superficie es difusa.

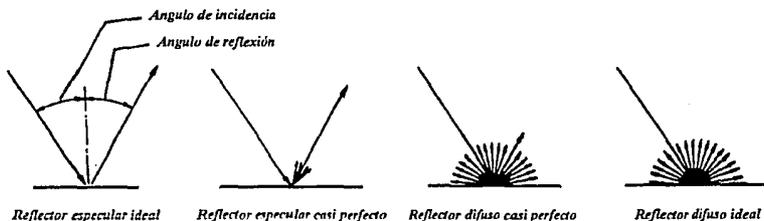


Figura 2.6
Carácter geométrico de distintas superficies

Las reflexiones difusas contienen información espectral del "color" de la superficie que reflejan, mientras que las reflexiones especulares no la contienen. De aquí que, en percepción remota, el interés se centra en medir las propiedades de reflectancia difusa de las características del terreno.

Las características de reflectancia de la superficie terrestre pueden ser cuantificadas midiendo la parte de energía incidente que es reflejada. Esta se mide como una función de la longitud de onda y es llamada reflectancia espectral, R_λ , la cual se define matemáticamente como

$$R_\lambda(\%) = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} \times 100 \quad (2.8)$$

donde $E_R(\lambda)$ = Energía de longitud de onda λ reflejada por el objeto

$E_I(\lambda)$ = Energía de longitud de onda λ incidente sobre el objeto

La gráfica de la reflectancia espectral de un objeto en función de λ se conoce como curva de reflectancia espectral. La configuración de las curvas de reflectancia espectral ofrece un panorama de las características espectrales de un objeto y tiene una fuerte influencia en la selección de la región espectral que debe abarcar la adquisición de los datos de percepción remota para una aplicación específica. La experiencia ha mostrado que muchas características superficiales de la Tierra de interés pueden ser identificadas, dibujadas en mapas y estudiadas bajo las bases de sus caracteres espectrales. También se sabe que algunas características de interés no pueden separarse espectralmente. Por tanto, para utilizar eficientemente los datos arrojados por la percepción remota uno debe conocer y entender los caracteres espectrales del objeto de estudio en cualquier aplicación. De la misma manera se deben conocer los factores que influyen en dichas características.

2.4.3

REFLECTANCIA ESPECTRAL DE VEGETACION, SUELO Y AGUA

La figura 2.7 muestra las curvas típicas de reflectancia espectral para tres tipos básicos de características terrestres: vegetación de gran follaje, suelo árido y seco, y extensiones de agua clara. Las líneas en esta figura representan curvas de reflectancia promedio obtenidas midiendo los caracteres de una gran cantidad de muestras. En general la configuración de estas curvas es un indicador del tipo y condición de los caracteres a los cuales se aplican. Aunque la reflectancia de caracteres individuales varíe considerablemente por encima o por debajo del promedio, estas curvas demuestran algunos puntos fundamentales relacionados con la reflectancia espectral.

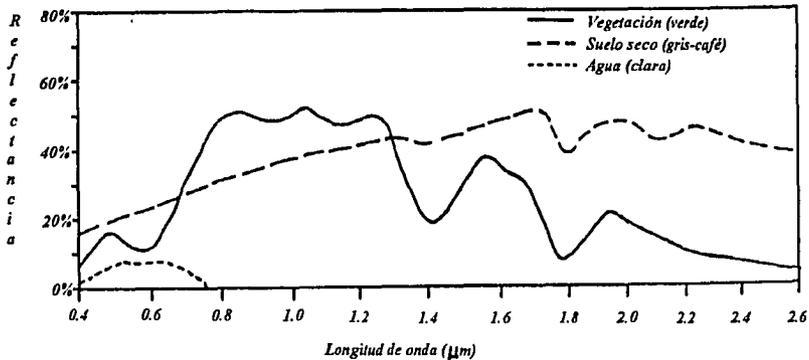


Figura 2.7
Curvas de reflectancia espectral

Por ejemplo, las curvas para la vegetación de gran follaje casi siempre manifiestan máximos y mínimos en su configuración. Los mínimos en la porción visible del espectro están determinados por el pigmento en las hojas de los árboles. La clorofila absorbe energía fuertemente en las bandas entre 0.45 y 0.65 μm de longitud de onda. De aquí que nuestros ojos perciban esa vegetación en color verde debido a la gran cantidad de energía azul y roja que las hojas absorben y a la muy alta reflexión de la energía verde. Si una planta estuviera sujeta a alguna forma de stress que interrumpiera su crecimiento y productividad normales, decrementaría o cesaría su producción de clorofila. El resultado sería una menor absorción en las bandas azul y roja. Frecuentemente la reflectancia roja se incrementa hasta el punto de que vemos cómo la planta se vuelve amarilla (rojo y verde combinados).

Al moverse desde la parte visible del espectro hacia la porción infrarroja, en las 0.7 μm , la reflectancia de la vegetación se incrementa radicalmente. En el rango de 0.7 a 1.3 μm una hoja refleja alrededor del 50% de la energía que se le incide. La mayor parte de la energía es transmitida dado que la absorción es mínima. La reflectancia de la planta en dicho rango proviene principalmente de la estructura interna de sus hojas. Dado que esta estructura varía grandemente entre diferentes especies de plantas, las medidas de reflectancia nos permiten distinguir las especies aún cuando visiblemente sean prácticamente iguales.

Más allá de las 1.3 μm , la energía que incide en la vegetación es esencialmente absorbida o reflejada, con una parte muy pequeña de energía transmitida. La depresión en la reflectancia ocurre a las 1.4, 1.9 y 2.7 μm porque el agua en las hojas absorbe mucha energía en esas regiones del espectro, de aquí que las longitudes de onda dentro de ese rango se conozcan como bandas de absorción de agua. Los máximos de reflectancia ocurren a las 1.6 y 2.2 μm , entre las bandas de absorción. A lo largo del rango más allá de 1.3 μm la reflectancia está aproximadamente relacionada en forma inversa con el total de agua presente en una hoja. Este total es una función del contenido de polvo y del espesor de la hoja.

La curva del suelo muestra considerablemente menos variaciones en la reflectancia. Esto es, los factores que influyen en la reflectancia del suelo actúan sobre menor cantidad de bandas espectrales específicas. Algunos de los factores que afectan al suelo en este sentido son contenido de polvo, textura (proporción de arena, sedimento y arcilla), rugosidad de la superficie, presencia de óxidos de hierro y contenido de materia orgánica. Estos factores son complejos, variables y están interrelacionados. Por ejemplo, la presencia de polvo en el suelo decremента su reflectancia. Este efecto es más notorio en las bandas de absorción de agua, en las 1.4, 1.9 y 2.7 μm . Otros factores que reducen la reflectancia son la rugosidad y el contenido de materia orgánica. La presencia de óxidos de hierro decremента la reflectancia significativamente al menos en el espectro visible. En cualquier caso, es esencial que el analista esté familiarizado con las condiciones del terreno.

Considerando la reflectancia espectral del agua, probablemente la característica más distintiva sea la absorción en rangos de la banda infrarroja reflejada. En resumen, el agua absorbe energía en esas longitudes de onda tanto si se habla de características del agua por sí misma como del agua contenida en la vegetación o el suelo. Localizar o delinear cuerpos de agua con percepción remota se realiza más fácilmente en longitudes de onda del infrarrojo reflejado debido a esta propiedad de absorción. Sin embargo, cuerpos de agua en diferentes condiciones se manifiestan por sí mismos en el espectro visible. La interacción entre la energía y la materia a dichas longitudes de onda son muy complejas y dependen de un gran número de factores interrelacionados. Por ejemplo, la reflectancia de un cuerpo de agua puede provenir de una interacción con la superficie del agua (reflexión especular), con material suspendido en ella o con el fondo del cuerpo de agua. Aún en aguas profundas donde los efectos del fondo son despreciables, las propiedades de reflectancia del cuerpo de agua no sólo son una función del agua en sí, sino también del material dentro de ella.

El agua limpia absorbe relativamente poca energía teniendo longitudes de onda menores que 0.6 μm . Esas ondas se tipifican por la alta capacidad de transmisión de la energía encontrando su máximo en la porción azul-verde del espectro. Sin embargo, al cambiar la turbulencia del agua (por la presencia de materia orgánica e inorgánica) la transmisión de energía -y evidentemente la reflectancia- cambia radicalmente. Algunas de las características más importantes del agua como la concentración de oxígeno disuelto, PH y concentración de sales no pueden ser observadas directamente al través de los cambios en la reflectancia. Sin embargo, dichos parámetros muchas veces se encuentran correlacionados con la reflectancia observada.

Resumiendo, existen muchas interrelaciones complejas entre la reflectancia espectral del agua y sus características particulares. Uno debe utilizar datos de referencia apropiados para interpretar correctamente las medidas de reflectancia hechas acerca del agua.

Todos estos aspectos de reflectancia son altamente importantes para la interpretación de imágenes de satélite de áreas urbanas, debido a la gran variedad de objetos que se pueden localizar en una ciudad, y también debido a la fuerte confusión que puede crearse en la interpretación, observación y análisis de dichas imágenes. Conociendo las características de reflexión de las distintas figuras urbanas puede efectuarse una clasificación muy cercana a la realidad de tales figuras, previo conocimiento de la zona de estudio. Más adelante se verá de qué manera esta clasificación interviene como una herramienta importante dentro del proceso de análisis de las imágenes.

2.5

EL SISTEMA LANDSAT

Es parte de la intención de este trabajo dar a conocer a mayor detalle las características de los dos satélites más utilizados en percepción remota para estudios de planeación. La información que sigue se puede conseguir en folletos de las compañías que manejan los derechos de ambas naves, sin embargo, se resumen aquí los datos esenciales.

El Sistema de Satélites Landsat, como ya se vio, originalmente llamado *ERTS*, es el primer satélite diseñado específicamente para obtener datos de la superficie de la Tierra. Los tres primeros de esta serie de satélites Nimbus modificados, fueron lanzados a órbitas circulares casi polares, síncronas solares, en altitudes que varían entre 897 y 918 kms. Landsat 1 se lanzó el 23 de julio de 1972, y rebasó con mucho su vida útil de diseño de un año al ser retirado el 6 de enero de 1978. Llevaba consigo un barredor multiespectral (*MSS*) de cuatro canales, tres sensores tipo Vidicon de rayo regresible (*RBV*), y dos grabadoras de cintas de video. El *MSS* operaba en los siguientes rangos espectrales: banda 4 (0.5-0.6 μm), banda 5 (0.6-0.7 μm), banda 6 (0.7-0.8 μm) y banda 7 (0.8-1.1 μm).

Las tres cámaras independientes del *RBV* cubrían tres bandas espectrales, azul-verde (0.47-0.575 μm), amarillo-rojo (0.58-0.68 μm) y el infrarrojo cercano (0.69-0.83 μm). Ambos sistemas (*MSS* y *RBV*) captaban escenas en tierra de 185×185 kms. con una resolución espacial de 80 metros. Debido a una falla, el *RBV* fue desactivado después de solamente 130 órbitas del satélite.

Con el lanzamiento del Landsat 2 el 22 de enero de 1975, el nombre de los satélites cambió a Landsat. La carga de este satélite fue similar a la de Landsat 1. Retirado el 22 de enero de 1980 debido a control insuficiente, fue restaurado el 21 de junio de 1980 basándose en estabilización magnética.

Landsat 3, lanzado el 5 de marzo de 1978 agregó una banda más al MSS en el infrarrojo térmico (10.4-12.6 μm). El RBV fue también modificado significativamente empleando dos cámaras idénticas que cubrían el espectro de 0.53 a 0.75 μm , las cuales, alineadas simultáneamente sobre el mismo punto obtenían escenas de 84 x 84 kms. en tierra aumentando su resolución espacial a 40 metros (ASP, 1983).

Son varias las limitaciones de los tres satélites Landsat mencionados: su pobre resolución espacial, sus canales espectrales no alineados en forma precisa hacia bandas de absorción conocidas, y el excesivo tiempo de espera para que las imágenes estén disponibles a los usuarios. El satélite Landsat D se diseñó precisamente para disminuir estas limitaciones. Continúa usando las cuatro bandas del MSS del Landsat 3, pero agrega un MSS avanzado llamado Mapeador Temático (TM). Este dispositivo provee señales en una única tonalidad para varios tipos de características relacionadas con los recursos, por lo que facilita la producción de mapas temáticos que pertenecen a estas categorías. El TM tiene siete bandas espectrales que cubren cuatro regiones del espectro: el rango visible (bandas 1 a 3), el infrarrojo cercano (banda 4) y el infrarrojo térmico (banda 7). La resolución de las primeras seis bandas es de aproximadamente 30 metros, mientras que la de la banda 7 es de 120 metros. Una diferencia fundamental entre el MSS y el TM es que el MSS barre la imagen en una dirección, mientras que el TM barre y obtiene datos en dos direcciones.

El sistema de colección de datos Landsat consiste de una combinación de estaciones terrenas, centros de control de operaciones y los Dispositivos de Procesamiento de Datos NASA (NDPF, del inglés: *NASA Data Processing Facility*). En septiembre de 1977 se estimó que el Centro de Datos EROS en Sioux Falls, EUA tenía casi 262,000 imágenes (de cuatro bandas cada una) recibidas por Landsat 1 y 2. En ese tiempo, aproximadamente 5,000 nuevas imágenes se estaban generando mensualmente.

Las plataformas espaciales Landsat circunnavegan a la Tierra cada 103 minutos completando 14 órbitas diarias permitiéndole observar toda la Tierra cada 18 días. La órbita fue seleccionada de tal forma que la huella terrestre del satélite repite su cobertura del planeta a la misma hora local cada 18 días dentro de 37 kms de su primera órbita. Cada día, la trayectoria cambia 160 kms en dirección Oeste. El traslape entre dos trayectorias consecutivas varía de 14% en el Ecuador a un 70% en latitudes polares. Las imágenes son tomadas entre las 9:30 y las 10:00 a.m. hora solar local, excepto en latitudes extremas.

Landsat ha constituido el principal acervo de imágenes para estudios realizados en nuestro país y en algunos otros países de América Latina desde su comercialización y hasta la fecha, aún cuando el satélite francés SPOT ofrece ciertas ventajas comparativas. Toda la información anterior se obtuvo de folletos publicitarios de EOSAT.

2.6

EL SISTEMA SPOT

El sistema SPOT, (del francés: *Système Probatoire d'Observation de la Terre*, Sistema de Pruebas de Observación de la Tierra), es un conjunto de adquisición y distribución de imágenes por satélite de vocación civil. Ha sido desarrollado bajo la responsabilidad del Centro Nacional de Estudios Espaciales CNES (del francés: *Centre National d'Etudes Spatiales*) en Francia con la participación de Suecia y Bélgica.

El primer satélite, SPOT 1, fue lanzado en febrero de 1986 y ha cumplido más que ampliamente su misión. Previsto para una duración operacional de 2 años y medio, se mantenía aún en operación el 30 de septiembre de 1990, es decir, 4 años y medio más tarde. Actualmente se encuentra sometido a pruebas bajo diversos modos de funcionamiento. SPOT 2, su hermano gemelo, fue lanzado en febrero de 1990. Ambos satélites estuvieron en operación simultáneamente durante varios meses, dado que el sistema SPOT fue diseñado para controlar dos satélites en el espacio. SPOT 3 tomará el relevo dentro de algunos años. Será idéntico a los dos primeros. En cuanto a SPOT 4, incluirá algunas modificaciones y un captor de definición baja destinado al estudio de la vegetación en grandes extensiones.

SPOT es una fuente permanente de datos para información geográfica y ofrece características únicas en el campo de la percepción remota espacial: resolución terrestre de 10 a 20 mts. por pixel, posibilidades flexibles de adquisición de datos para cualquier punto sobre la superficie de la Tierra, posibilidad de visión estereoscópica y una excelente aproximación geométrica (figura 2.8).

El satélite está colocado en una órbita circular, inclinada 8° respecto al Norte magnético, a una altitud promedio de 830 kms. Completa una vuelta a la Tierra cada 101 minutos, es decir, da algo más de 14 vueltas al planeta en 24 horas. La separación entre órbitas consecutivas es de 2,823 kms., y pasa verticalmente por encima de un punto fijo sobre la superficie terrestre cada 369 revoluciones, esto es, cada 26 días (figura 2.9).

Debido a su órbita polar, SPOT puede obtener imágenes hasta la latitud 84° tanto Norte como Sur. La órbita de SPOT 1 fue escogida especialmente para dar una perfecta sincronización con el Sol. Por lo tanto, las condiciones de luz son idénticas para todas las imágenes tomadas a la misma latitud en un mismo período. Aunque el azimut solar y su elevación varían a lo largo del año, el ángulo entre el Sol, el centro de la Tierra y el plano orbital permanece constante.

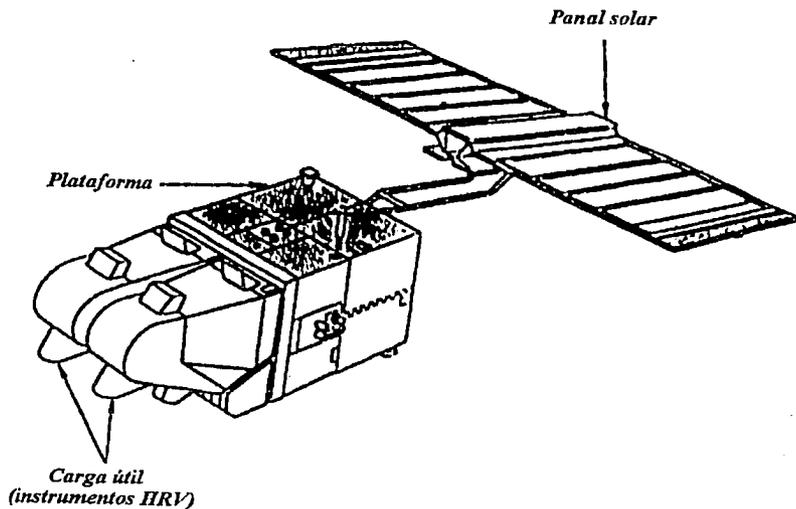
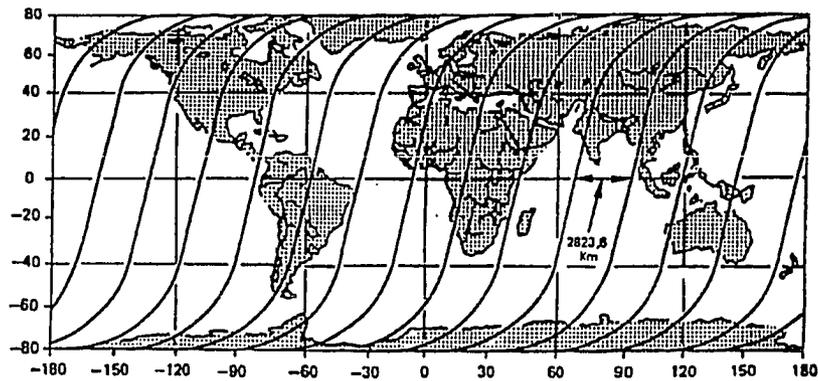


Figura 2.8
La plataforma espacial SPOT



Fuente ambas figuras: Curso de Percepción Remota por GDTA, Francia

Figura 2.9
Planos orbitales de SPOT

Los satélites SPOT están equipados con dos instrumentos fotográficos, HRV 1 y HRV 2 (del francés: *Haute Résolution Visible*, Alta Resolución Visible), que trabajan independientemente. Ambos instrumentos rastrean una franja en la superficie de la Tierra de 60 a 80 kms. en la dirección Este-Oeste, este ancho puede variar con el ángulo de visión. Los datos son cortados cada 60 kms. en "escenas" cuyo tamaño varía de 60×60 a 60×80 kms. Cuando los dos instrumentos funcionan juntos las dos escenas captadas se traslapan 3 kms. Cuando esto sucede en vistas perfectamente verticales, el ancho total del área captada es de 117 kms. La orientación de la escena con respecto tanto al Norte como al ángulo de visión varía con la latitud.

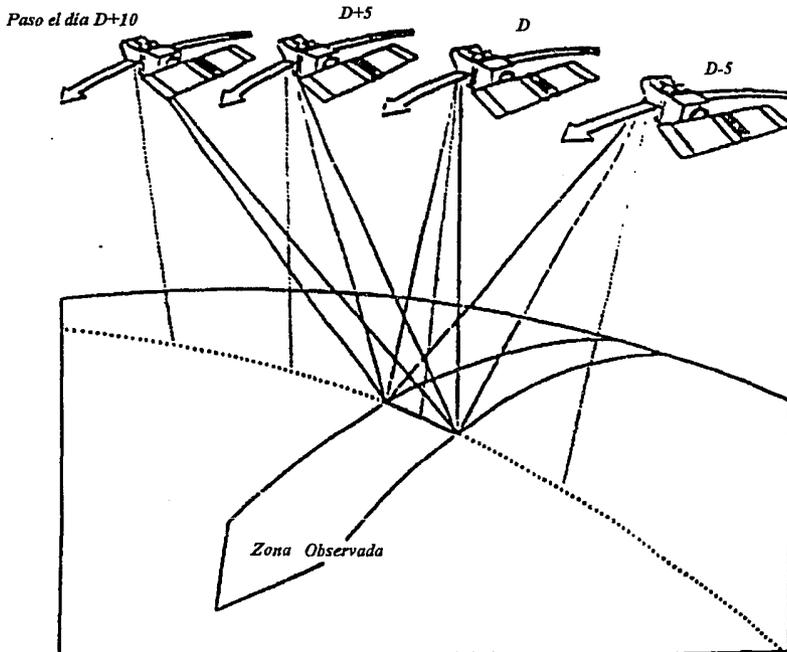
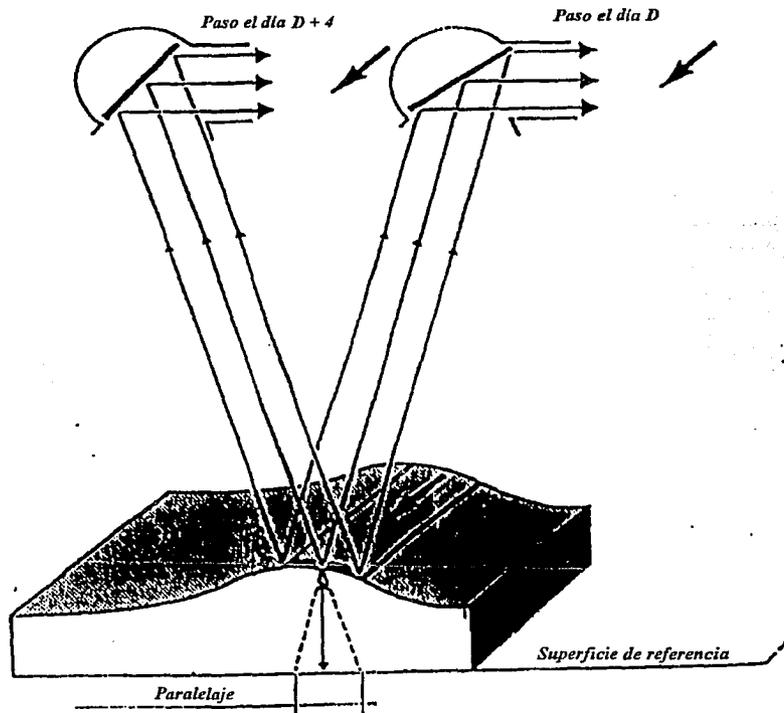


Figura 2.10
Escenas en tierra captadas por SPOT

Por otra parte, el instrumento HRV permite efectuar tomas de vista oblicuas hasta en un ángulo de 27° . Esta toma de vistas oblicuas permite:

- repetir observaciones más frecuentemente que en el ciclo orbital de 26 días (figura 2.10)
- observar estereoscópicamente mediante dos imágenes tomadas en dos ángulos diferentes y por lo tanto en dos fechas distintas (pero lo más cercanas posible) (figura 2.11).

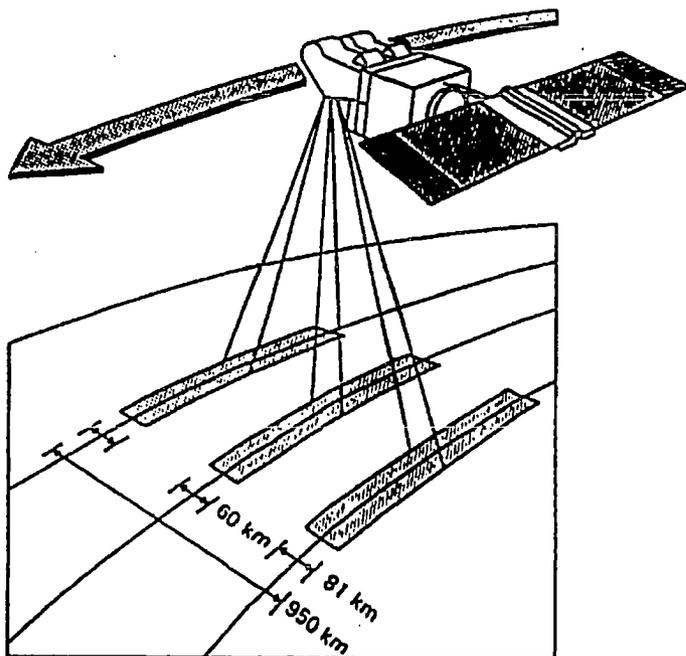


Fuente: Curso de Percepción Remota, GDTA, Francia

Figura 2.11
Estereoscopia en SPOT

La toma de vistas oblicuas aumenta el campo de observación que pasa a un alcance de 81 kms. de ancho en el caso del enfoque extremo ($\pm 27^\circ$), lo que corresponde a una superficie en el suelo de 20×27 mts. para un detector en modo XS (figura 2.12).

SPOT cuenta con dos modos de captación de imágenes: el modo pancromático es ejecutado en una sola banda espectral, correspondiente a la parte visible del espectro excepto el azul. La banda cubre el rango de 0.51 a 0.73 μm . Esta modalidad provee imágenes en blanco y negro con una resolución espacial de 10 mts. por pixel. El modo multiespectral se efectúa en tres bandas espectrales: la banda XS1 que cubre de 0.50 a 0.59 μm . (verde), la banda XS2 de 0.61 a 0.68 μm . (rojo) y la banda XS3 de 0.79 a 0.89 μm . (infrarrojo cercano o reflejado). Combinando los datos registrados en estas tres bandas, pueden producirse imágenes a color con resolución espacial de 20 mts. La importancia de este tipo de imagen multiespectral en relación con una imagen en modo pancromático es que permite distinguir muchos más tipos de ocupación del suelo. En efecto, dos temas diferentes pueden tener la misma respuesta espectral en un sector de longitud de onda, pero respuestas totalmente diferentes en otro sector.



Fuente: Curso de Percepción Remota, GDPA, Francia

Figura 2.12
Resolución espacial en SPOT

3. EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES

3.1

INTRODUCCION

El uso de computadores para el proceso de imágenes se remonta a más de treinta años de distancia y la tecnología del procesamiento digital de las mismas se encuentra en expansión continua. Con base en Green (1983) y Lillesand (1979), se desarrolla este capítulo con el objetivo de proporcionar bases de conocimiento para los futuros usuarios del procesamiento de imágenes digitales.

Las fuentes de imágenes digitales incluyen sistemas y satélites de percepción remota, rastreadores de filmes, digitalizadores de video, sensores digitales, sistemas biomédicos y sistemas militares. Una gran variedad de tipos de datos pueden ser almacenados, procesados y desplegados en formatos digitales. Las aplicaciones son vastas incluyendo campos como geología, astronomía, ciencias planetarias, meteorología, estudios de uso del suelo, estudios forestales, cartografía, agricultura, medicina y aplicaciones militares. La tecnología del procesamiento de imágenes digitales ha evolucionado rápidamente debido a varios factores:

1. Los sistemas de imágenes digitales son capaces de captar imágenes que tienen un rango dinámico mayor que el ojo humano o cualquier película fotográfica. El ojo puede distinguir algo menos que 100 tonalidades de gris y una película fotográfica común puede reproducir del orden de 50 tonalidades de gris. Una imagen digital puede usarse para representar varios cientos e inclusive varios miles de tonos de gris. Lo anterior también es aplicable al rango de colores.
2. Una sola imagen digital puede presentar una gran cantidad de información en una forma compacta y fácil de interpretar. Dicha imagen formada por algunos millones de bits de información puede ser desplegada en un pequeño papel fotográfico o bien en un monitor de computador. El uso de imágenes provee las ventajas inherentes al proceso visual humano incluyendo los procesos mentales de la percepción humana, además de un modo efectivo de despliegue que puede ser interpretado por grupos interdisciplinarios de observadores, sin necesidad de entrenamientos especiales.

3. Los computadores digitales pueden procesar y manipular imágenes usando métodos que no pueden ser imitados por tecnologías no digitales. Pueden aplicarse variedades de transformaciones a las imágenes (inclusive transformaciones no lineales) que no pueden ser efectuadas por el ojo humano. Se puede explotar el potencial estadístico de una imagen al través de relaciones matemáticas que existen entre múltiples imágenes tomadas de la misma escena. Así mismo, las técnicas digitales pueden usarse para establecer análisis basado en la correlación de los datos de una imagen con datos no provenientes de una imagen, incluyendo bases de datos georreferenciadas.
4. El crecimiento en todas direcciones de la tecnología de la computación digital ha permitido el avance del procesamiento de imágenes. La tendencia hacia elementos computacionales más rápidos y más baratos, dispositivos de almacenamiento de datos digitales de gran capacidad y alta densidad, y el mejoramiento de tecnologías de despliegue de imágenes han provocado posibilidades antes no pensadas en el proceso, manipulación y despliegue de imágenes digitales.

3.2

DEFINICIONES BASICAS

Una imagen digital puede ser vista como una matriz de números. La figura 3.1 muestra un ejemplo simple de una imagen digital. La escena es un cuadro negro sobre fondo blanco. A la derecha se muestra una posible representación digital. Cada punto dentro de esta corresponde a un área del objeto que se representa y se le asigna un valor digital a cada punto en la imagen, que está relacionado con la intensidad del área del objeto. Existen ciertos criterios para generar la representación digital de la escena mostrada en la figura. Uno de ellos considera la cantidad de puntos usados para generar la representación digital discreta partiendo de la escena real continua. En la figura se puede observar que la cantidad de puntos fue seleccionada de tal manera que un objeto del tamaño del cuadro negro pueda aparecer en la imagen digital como un objeto de 2 por 2 elementos. Una cantidad de puntos más grande produciría mayores elementos en la matriz para representar un cuadrado del mismo tamaño y una cantidad menor podría significar que un objeto del tamaño del cuadrado puede no ser detectado en la representación digitalizada de la misma escena.

<i>Objeto</i>	<i>Imagen digitalizada</i>
	1 1 1 1 1 1 1 1
	1 1 1 1 1 1 1 1
	1 1 1 0 0 1 1 1
	1 1 1 0 0 1 1 1
	1 1 1 1 1 1 1 1
	1 1 1 1 1 1 1 1
	1 1 1 1 1 1 1 1

Figura 3.1
Imagen digitalizada de un cuadro negro sobre fondo blanco

El segundo criterio se relaciona con la representación de la intensidad dentro de la imagen tomada. En la figura, se utiliza un solo bit (dígito binario 0 ó 1) para representar la intensidad de cada posición dentro de la imagen. El cuadro negro tiene una intensidad representada por cero y la intensidad del fondo blanco se representa por unos en la imagen digital.

A primera vista la digitización de imágenes en la que interviene solamente un bit para su representación puede parecer inútil dado que las imágenes son presentadas al través de diferentes tonalidades de colores, sin embargo, la aplicación de la representación de imágenes con un solo bit es muy vasta, como podría ser la transmisión de documentos por fax, diseño de equipo de reconocimiento óptico de caracteres, etc.

La figura 3.2 ilustra algunos de los conceptos básicos del proceso de imágenes. La matriz bidimensional de números se conoce como imagen digital. Para establecer una orientación espacial de la imagen tomada, los elementos de la matriz serán ubicados según renglones y columnas. Cada componente individual de la imagen digital se conoce como *pixel* (del inglés: *picture element*, elemento pictórico). El valor digital de cada pixel que representa la intensidad se conoce como intensidad digital. Utilizando esta notación, la intensidad digital del pixel colocado en la línea 3, columna 4, en la imagen digital de la figura 3.1 es cero. Como convención, las intensidades digitales bajas representan intensidades reales de luz bajas. En una imagen blanco y negro, una intensidad digital cero representa el negro.

	Columnas	→					
Renglones	↓	135	127	125	122	95	20
		129	124	122	121	87	35
		125	127	120	118	92	31

Figura 3.2
Imagen representada por una matriz numérica

La figura 3.3 contiene una representación digital distinta de la escena mostrada en la figura 3.1. Se utilizó la misma cantidad de puntos para generar esta nueva versión, pero el número de bits usado para representar la intensidad digital se incrementó de 1 a 8. De aquí que los valores de intensidad digital puedan variar desde cero hasta 255 (ya que el número decimal más grande que puede ser representado con 8 dígitos binarios es 255), con cero representando al negro y 255 representando al blanco. En la figura 3.3 se muestran distintos efectos que ocurren cuando se crea una representación digital de una escena continua, nótese primeramente que los valores digitales que representan el cuadro negro tienen valores de intensidad distintos, a pesar de parecer una tonalidad continua (valores 3, 2, 2 y 4). La mayoría de los sistemas que generan imágenes digitales introducen ruido aleatoriamente en algún grado dentro de la imagen. Si no fuese así, los valores de las cuatro intensidades de negro en el cuadrado serían los mismos. El ruido aleatorio inducido por el sistema causa una

fluctuación aleatoria alrededor de la media de las intensidades digitales. Este efecto puede deberse a la electrónica del sistema o por el proceso de conversión de la imagen de analógica a digital.

Objeto	Imagen digitizada							
	255	255	255	255	255	255	255	255
	255	255	255	126	132	255	255	255
	255	255	119	3	2	120	255	255
	255	255	123	2	4	119	255	255
	255	255	255	121	118	255	255	255
	255	255	255	255	255	255	255	255
	255	255	255	255	255	255	255	255
	255	255	255	255	255	255	255	255

Figura 3.3
Imagen digital con mayor información

El segundo efecto que se puede notar es la falta de fronteras bien definidas del cuadro negro. En la figura 3.1 el cuadrado negro está perfectamente bien delimitado en sus orillas, pero la figura 3.3 muestra exactamente lo que ocurre cuando una frontera bien definida se utiliza para crear una representación digital discreta. La resolución espacial dentro de la imagen digital es menor que en la imagen real. La degradación en la frecuencia que ocurre al digitalizar la escena puede determinarse captando imágenes que contengan fronteras de alto contraste y midiendo la frecuencia de respuesta a lo largo de la frontera. La degradación se debe a dos causas. La primera es el proceso de muestreo por sí mismo, el cual provoca una degradación en la resolución al intentar representar una señal continua con un conjunto de puntos discretos. La segunda puede estar en la óptica utilizada por el dispositivo que obtiene las imágenes, el cual puede contribuir a la pérdida de resolución. La mayoría de los sistemas de imágenes están diseñados de manera que el proceso de rastreo sea el que tenga la principal limitante en la capacidad de resolución en vez de que esta limitante la tenga el sistema óptico.

En la figura 3.3, la transición negro-blanco en la imagen ocurre en un rango de 3 píxeles (por ejemplo, del píxel [3, 2] al píxel [3, 4] hay una transición de 255 \rightarrow 119 \rightarrow 3). Una mayor frecuencia de rastreo daría una definición más precisa de la frontera de alto contraste; el efecto de degradación en la resolución estaría aún presente, pero sería menos severo. También se generaría una representación digital más grande de la misma imagen.

3.3

IMAGENES MULTIESPECTRALES

Los ejemplos mostrados hasta aquí muestran imágenes adquiridas en una sola región del espectro electromagnético. Las técnicas de procesamiento de imágenes digitales no se limitan a imágenes blanco y negro ni de un sólo color. La figura 3.4 muestra el concepto de un sensor que adquiere imágenes digitales de la misma escena en distintas partes del espectro electromagnético. Los mismos datos de la imagen se pasan al través de tres filtros

espectrales que separan la misma en tres componentes espectrales separadas. Cada componente por separado se digitaliza de manera que resulte una representación de la escena digital en tres colores.

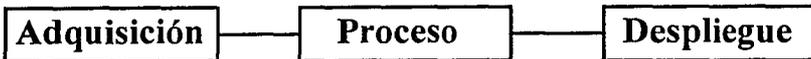


Figura 3.4
Conceptualización de un sistema de manejo de imágenes

En algunos casos los filtros pueden corresponder a las regiones de respuesta correspondientes a los colores rojo, verde y azul que usualmente se utilizan en una película fotográfica convencional de color, así las cosas se tienen tres imágenes digitales que representan los componentes espectrales rojo, verde y azul de la imagen original. Una imagen multispectral está entonces constituida de n matrices diferentes, una para cada banda. Por ejemplo, una imagen SPOT multispectral (o en modo XS) posee tres bandas o canales llamados XS_k , donde $k=1,2,3$. El píxel P_{ij} tiene como coordenadas la línea i y la columna j , además de tres mediciones físicas asociadas $XS1_{ij}$, $XS2_{ij}$, $XS3_{ij}$, llamadas intensidades o valores radiométricos (figura 3.5). Las intensidades radiométricas de un canal en bruto son recuentos numéricos que pueden alcanzar valores comprendidos entre dos límites extremos que son, en general, 0 y 255. En este caso, hay 256 valores posibles (2^8). Los valores están codificados en 8 bits (1 byte) que se obtienen luego de un muestreo espacial y numérico de los datos medidos.

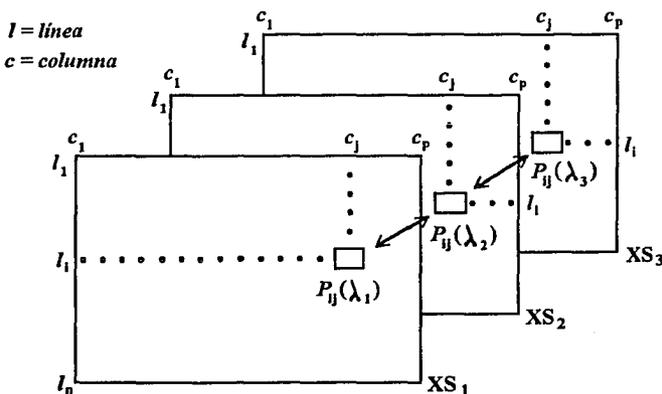


Figura 3.5
Componentes de una imagen digital

Actualmente se utiliza una gran variedad de técnicas para procesar, manipular y desplegar imágenes multiespectrales que cada área de aplicación ha desarrollado, sin embargo, debe notarse que el concepto de imagen multiespectral es un poco general dado que es posible mezclar datos de otros tipos que originalmente no están relacionados con el concepto de imagen en sí, dichos datos pueden ser población, infraestructura, elevación del terreno, calidad del aire, etc. Más adelante se describen algunas de las técnicas de procesamiento así como la relación con otro tipo de parámetros.

3.4 UN ENFOQUE SISTEMICO DEL PROCESAMIENTO DE IMAGENES DIGITALES

Con una visión sistémica, puede esquematizarse a un sistema de procesamiento de imágenes digitales en tres bloques, conteniendo los siguientes elementos:

1. *Adquisición de la imagen.* Involucra la conversión de una escena a una representación digital que pueda ser procesada por un computador. Dicha adquisición de imágenes puede hacerse por medio de un conjunto de sensores especialmente diseñados para observar una escena y proveer una representación digital de la misma. La adquisición de imágenes puede referirse también a la conversión de imágenes ya existentes (televisión, películas, etc.) a representaciones digitales.
2. *Procesamiento de la imagen.* Este bloque provee el proceso digital de una o más imágenes para producir un resultado deseado. El procesamiento puede ir desde el mejoramiento de una imagen individual, para un despliegue más detallado, a un proceso más complejo involucrando varias imágenes compuestas (por ejemplo en la clasificación multiespectral), o bien varios cientos de imágenes para realizar, por ejemplo, fotomosaicos de una gran región del planeta.
3. *Despliegue de la imagen.* Provee un producto de salida que puede ser visto por un observador humano. El despliegue puede realizarse utilizando técnicas volátiles (monitores) o permanentes (papel, películas). Este bloque arroja la conversión analógica necesaria para la representación de la imagen digital, por ejemplo, señales de video o productos filmicos.

Actualmente existen dispositivos periféricos computacionales especializados para realizar las funciones contenidas dentro de estos bloques; adicionalmente se requieren los computadores en la ejecución de algunas de ellas. Los tres bloques necesitan de programas de computador tanto para procesar la imagen como para controlar el flujo de datos dentro de todo el sistema en sí. Frecuentemente es necesario desarrollar o adaptar un manejador de base de datos para monitorear la imágenes que entran al sistema, las nuevas versiones de las imágenes existentes y los productos terminados arrojados por los programas de procesamiento en distintos formatos.

3.4.1 SISTEMAS DE ADQUISICION DE IMAGENES DIGITALES

Un sistema de adquisición de imágenes es un dispositivo que genera una representación digital de una escena por puntos. La escena continua que es observada por algún tipo de sensor se convierte en un conjunto de puntos discretos, que pueden ser procesados por un sistema digital de cómputo. Las imágenes pueden obtenerse, como ya se vió, en una o en varias regiones espectrales. Una imagen que un observador vería a color se adquiere con un sistema que capta la escena con tres filtros espectrales secuencialmente (rojo, verde y azul). Los sistemas multispectrales pueden adquirir imágenes en regiones espectrales para las cuales el ojo humano no es sensible, como pueden ser las regiones del ultravioleta, infrarrojo, microondas y rayos X. En todos los casos, el producto tiene la misma forma, es decir, una imagen digital que no dejará de ser una matriz numérica donde cada elemento tendrá un valor numérico relacionado con la brillantez de la escena en ese punto, dentro de la región espectral que se trate. Una imagen multispectral será así representada por un conjunto de matrices individuales, una para cada banda espectral tomada por el sistema.

Existen tres grandes categorías de sistemas de adquisición de imágenes. Aquí solamente se mencionarán sin entrar en detalles, por no ser de interés en el desarrollo de la tesis.

1. *Sensores de imágenes digitales.* Estos dispositivos adquieren la imagen ya digitizada de la escena vista por el sensor. La salida de estos sistemas puede ser multispectral.
2. *Barredores filmicos.* Se utilizan para convertir transparencias en representaciones digitales para un posterior procesamiento computarizado. Existen varios mecanismos usados para barrer la transparencia punto por punto, produciendo una intensidad digital para cada punto barrido. Estos dispositivos pueden barrer también imágenes multispectrales.
3. *Digitizadores de video.* Los sistemas convencionales de televisión proveen imágenes analógicas de escenas aproximadamente cada trigésimo de segundo. Los digitizadores de video ya sea "congelan" un cuadro de la imagen y lo digitizan punto por punto, o bien barren el campo de visión de la cámara por algunos segundos digitizando punto por punto, al tiempo que se adquieren las imágenes secuencialmente.

3.4.2 TECNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMAGENES

Las técnicas de procesamiento de imágenes caen en una de estas categorías: subjetivas y cuantitativas. El procesamiento subjetivo de imágenes (también llamado *mejoramiento de imágenes*) se ejecuta usualmente de manera amigable, interactiva e iterativa. Es un proceso de ensayo y error, cuyo éxito se basa en la habilidad del observador para detectar información de interés para él en la imagen final una vez procesada (o mejorada). Las técnicas empleadas en el procesamiento subjetivo de imágenes frecuentemente son simples y fácilmente implantables en el equipo suministrado con muchos dispositivos de despliegue de imágenes disponibles actualmente.

El procesamiento cuantitativo de imágenes se lleva al cabo de manera no amigable ni interactiva. Se basa en algoritmos matemáticos predefinidos y su éxito depende de la exactitud del modelo matemático usado. En seguida se analiza cada una de estas técnicas por separado.

3.4.2.1

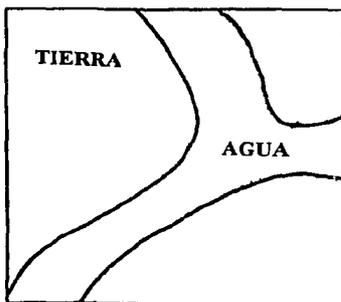
TECNICAS SUBJETIVAS

El principio fundamental del procesamiento de una imagen es asociar un color (en términos generales puede ser una intensidad de gris) a cada valor radiométrico, conservando al mismo tiempo la representación matricial de la imagen. Hay entonces dos posibilidades de procesamiento: en un solo canal o en varios canales en síntesis aditiva de colores.

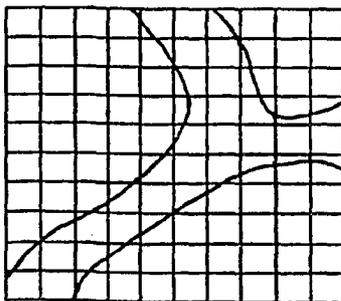
3.4.2.1.1

PROCESAMIENTO EN BLANCO Y NEGRO

Los mapas gráficos de procesamiento de imágenes elaborados permiten restituir en la pantalla 256 tonos de gris (restituyen de hecho 256 tonos en cada color primario: azul, verde, rojo, lo que permite obtener en el monitor de color 256 tonos de gris por síntesis aditiva de tres haces de color de intensidades equivalentes). Sin embargo, el ojo humano no puede distinguir esos 256 tonos de gris (o de cualquier otro color); además, puede haber limitaciones provenientes del sistema de restitución de imágenes (una impresora limitada, por ejemplo, a 16 tonos de gris). Ello puede conducir a comprimir la información inicial codificada sobre 256 valores), llevándola a 16 valores, dividiendo el intervalo 0-255 en 16 partes iguales. Por otro lado, al procesar un canal en bruto se puede descubrir que no todos los valores numéricos han sido captados en la imagen en bruto, dado que no todos los tonos de gris están presentes en la imagen (figura 3.6), por lo tanto, será necesario conocer previamente la repartición de los pixels de la imagen en el intervalo 0-255.



TERRENO



MUESTREO ESPACIAL

100	117	92	83	33	29	30	57	92	103
114	121	119	107	84	30	31	60	79	63
123	124	131	112	87	42	25	34	44	49
148	150	144	132	98	33	24	29	40	37
143	148	140	127	100	37	24	23	25	29
132	137	129	111	34	28	27	30	41	42
93	112	101	42	23	30	49	47	69	68
87	34	24	23	41	63	70	69	74	72
30	20	19	49	67	64	68	107	91	112
22	23	43	34	77	62	66	83	92	127

MUESTREO NUMERICO

Figura 3.6
Muestréos espacial y numérico en una imagen para digitizarla

Una herramienta básica en el análisis de una imagen es su **histograma**. El histograma revela la distribución de la intensidad digitizada de la imagen; es por decirlo así, una gráfica del número de pixels que tienen una intensidad dada: $N(b)$ contra b . En la figura 3.7 se muestran tres ejemplos de histogramas de imágenes.

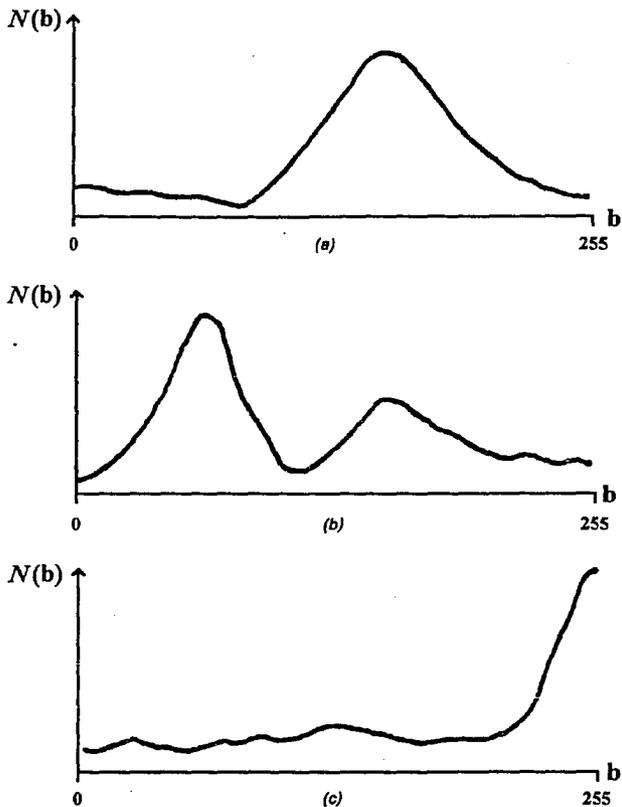


Figura 3.7
Histogramas de distintas imágenes

El histograma de la figura 3.7(a) representa una imagen bien expuesta con la mayoría de las intensidades de los píxels cayendo en la mitad de la escala. El histograma de la figura 3.7(b) es bimodal con dos máximos distintos; esto indica que puede tratarse de una imagen de alto contraste con grandes regiones oscuras y grandes regiones claras. La escena de un atardecer con cielo brillante y superficie oscura puede originar este tipo de histograma. La figura 3.7(c) muestra el histograma de una imagen sobrepuesta. La mayoría de los píxels se han saturado en el blanco total o cerca de él. Es posible manipular el contraste de las imágenes que produjeron los histogramas 3.7(a) y 3.7(b) usando técnicas de procesamiento descritas más adelante, sin embargo, no hay manera de arreglar una imagen sobrepuesta, la solución es volver a captarla con la exposición adecuada.

Frecuentemente es útil calcular el porcentaje de píxels que poseen determinada intensidad. Si una imagen contiene L líneas y C columnas, el porcentaje de píxels de la intensidad b está dado por

$$p(b) = \frac{N(b)}{L \cdot C} \times 100 \quad (3.1)$$

La función de distribución acumulada que es también útil, representa el porcentaje de píxels con intensidad menor o igual a un valor particular b , y se calcula con

$$F(b_i) = \sum_{k=1}^i p(b_k) \quad (3.2)$$

La mayoría de los sistemas de imágenes digitales pueden resolver más niveles de intensidad que los presentados por dispositivos filmicos. Estos niveles de intensidad varían de 0 a 255, y son producidos por equipos de cámara, barredores filmicos o digitizadores de video que cuantifican el intervalo de brillantez observado, utilizando resolución de 8 bits. El ojo humano puede distinguir aproximadamente 32 distintas tonalidades de gris. El sistema de imagen digital provee mayor información a este respecto que el ojo humano. Sin embargo, ciertos dispositivos, como las películas, también tienen limitación en cuanto a la resolución de la intensidad; así por ejemplo, una fotografía en blanco y negro abarcará a lo más 32 tonos de gris. Cuando una imagen se graba en una película, todo el intervalo de intensidades se despliega de manera que al negro le corresponde la mínima intensidad cuantificable y al blanco la máxima. Para un sistema de 8 bits, el negro representa $b=0$ y el blanco $b=255$. Así, cuando una imagen de 8 bits es desplegada en un dispositivo filmico, como una película, las 255 intensidades de gris disponibles en la imagen son agrupadas a una proporción aproximada de 255:32, es decir, alrededor de 8:1.

Si una imagen digital tiene una distribución de intensidades tal que la mayoría de los píxels caigan dentro de un intervalo pequeño del rango de valores de intensidad, el despliegue de la imagen no procesada resultará de muy bajo contraste y perderá mucha de la información contenida realmente en la imagen. En el histograma de la figura 3.7(a), la mayoría de los píxels están agrupados alrededor del punto medio de gris del histograma. Si la imagen fuera impresa en una película blanco y negro sin ningún tipo de modificación, el resultado sería casi todo gris, teniendo a lo mucho variaciones de uno o dos tonos del gris medio.

Modificar una imagen, mejorarla adaptando su dinámica, equivale de hecho a modificar la función de correspondencia entre valores numéricos y una gama de colores con el objetivo de aumentar el contraste global de las informaciones contenidas en la imagen. Equivale, por lo tanto, a hacer corresponder valores comprendidos entre uno mínimo y otro máximo con nuevos valores distribuidos en 255 tonalidades, de manera que se utilicen todas las tonalidades de color posibles en la imagen. De aquí que se desee determinar una función de transformación de valores numéricos a fin de restituir la dinámica máxima (que va de la oscuridad a la intensidad -en este caso del negro al blanco- para una visualización monocroma). Se puede distribuir la dinámica de diferentes maneras entre los dos valores mínimo y máximo. Las más comunes se mencionan a continuación.

El mejoramiento lineal consiste en interpolar las intensidades de la imagen llevándolas a un rango menos amplio, es decir, se busca la menor intensidad y se le hace corresponder el valor $b=0$, posteriormente se busca la mayor intensidad a la que se le asignará el valor $b=255$; hecho esto, se reconstruye el histograma interpolando linealmente, con los nuevos valores, lográndose así una mejor distribución de las intensidades y por lo tanto un mejor contraste.

Cuando el histograma tiene más de un máximo (p.e. histogramas bimodales) es deseable realizar la técnica anterior en subintervalos, es decir, efectuar un mejoramiento lineal dentro de cada parte del histograma que presente un máximo; a esta técnica se le conoce como **mejoramiento lineal por partes**.

En la figura 3.8 se encontrará un histograma de un canal en bruto semejante a la imagen de la figura 3.6 pero expresada en forma gráfica, lo que permite visualizar sus diferentes modos (modo es un pico del histograma que corresponde a un máximo de frecuencia para valores característicos de ocupación del suelo, mar o agua, nubes, sombras, nieve, etc.), de aquí que el histograma presentado sea bimodal donde el primer modo corresponde a la entidad "agua" de la imagen y el segundo a la entidad "tierra". Se puede constatar en esta imagen que los valores radiométricos de los pixeles de este canal están comprendidos entre 2 límites, mínimo y máximo que no son 0 y 255 (valores MIN y MAX).

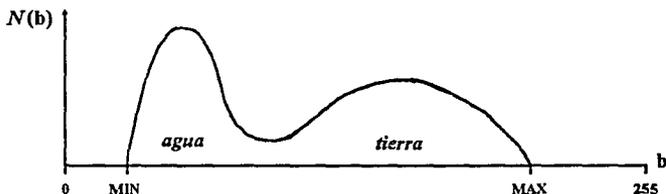


Figura 3.8
Histograma bimodal para distintas entidades en una imagen

En la figura 3.9 la imagen sometida a un mejoramiento lineal entre MIN y MAX provoca un histograma donde se encuentran ahora valores comprendidos entre 0 y 255 y se utiliza por lo tanto una gama de grises que va desde el negro (0) hasta el blanco (255). Los valores MIN y MAX pueden definirse de manera interactiva como en el histograma, o de manera automática, dejando por ejemplo el 1% de los valores por debajo de MIN y el 1% por encima de MAX; se entiende que los valores inferiores a MIN quedan saturados en 0 y los superiores a MAX quedan saturados en 255.

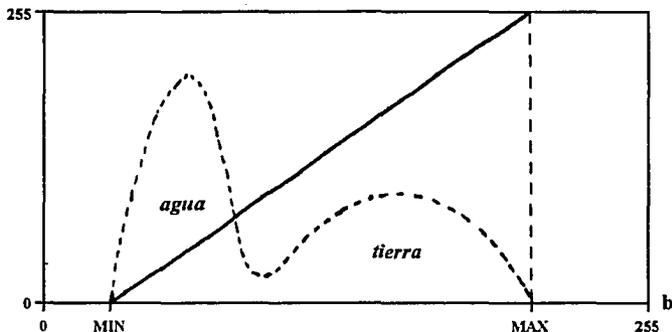


Figura 3.9
Histograma de la imagen mejorada linealmente

Para mejorar el contraste de la entidad "agua", se pueden ahora definir dos nuevos valores MIN y MAX que correspondan a los valores mínimo y máximo de los pixels "agua". En la imagen sometida a una transformación de este tipo, los pixels de la entidad "tierra" se encuentran entonces saturados en 255, pues toda la gama de colores se utilizará en la entidad "agua". En la figura 3.10 se aprecia esta función de adaptación de la dinámica lineal que mejora localmente la imagen en su parte "agua".

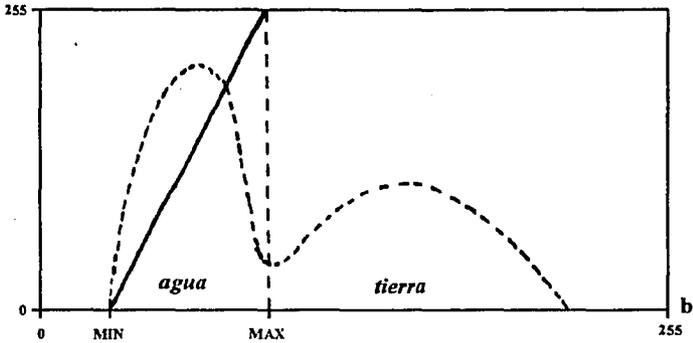


Figura 3.10
Mejoramiento de la imagen en la entidad "agua"

Del mismo modo se puede destacar la entidad "tierra" con la función lineal presentada en la figura 3.11.

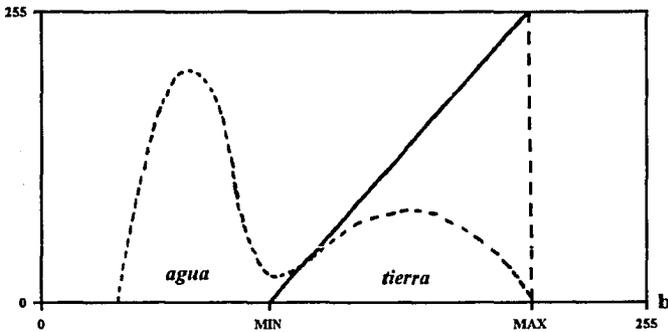


Figura 3.11
Mejoramiento de la imagen en la entidad "tierra"

Considérese la curva de representación de un histograma cualquiera. Existe en la rama de la Estadística otra forma de representar este histograma llamada *función de repartición*. Esta función se aprecia en la figura 3.12 para el caso de la imagen en la figura 3.6 y es llamada habitualmente histograma acumulado del canal que se considera. Expresa por ejemplo que el 47% de los pixels tienen una intensidad radiométrica inferior o igual a 57. El mejoramiento por equidistribución consiste en adaptar la imagen según la curva del histograma acumulado. Ello permite separar mejor los valores más representados, que corresponden en general a entidades radiométricamente homogéneas en la imagen (p.e. el agua), y acercar los valores marginales que corresponden a entidades radiométricamente heterogéneas, como por ejemplo el medio urbano.

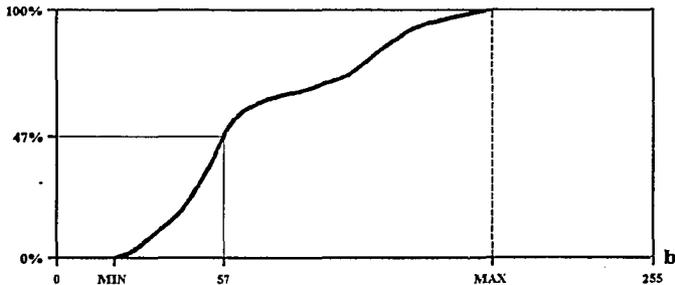


Figura 3.12
Frecuencia relativa acumulada del histograma (repartición)

Sin entrar en detalles, se puede definir una infinidad de distribuciones de dinámica. Basta con definir una función de correspondencia entre valores radiométricos de la imagen en bruto y diferentes niveles visualizados de gris. La mayor parte del software de procesamiento de imágenes permite al usuario trazar de manera simple una curva cualquiera de adaptación de dinámica. Entre otros ejemplos, esta curva podría ser:

- lineal por segmentos (con diferente pendiente según los intervalos)
- en escalera (constante por intervalos)
- de forma logarítmica o exponencial, etc.

3.4.2.1.2

PROCESAMIENTO EN COLORES

Se darán algunas nociones básicas de tricromía antes de entrar en detalles de procesamiento en color.

Se puede definir al color como la componente de radiación de longitud de onda $\Delta\lambda$ que es reflejada (o emitida) por un objeto que recibe luz blanca; es decir, el objeto recibe luz con todas las longitudes de onda de la banda visible del espectro, pero refleja preferentemente las longitudes de onda λ de la banda $\Delta\lambda$ que corresponden a un color dado (dependiendo de la longitud de onda que se trate). Esta definición puede extenderse a la región no visible del espectro. Es una interacción entre un objeto, la luz que lo ilumina y un receptor (por ejemplo, el ojo) quien analiza e interpreta la fracción de la señal reflejada en su dirección. En 1669 Sir Isaac Newton fue el primero en demostrar con un prisma que la luz blanca puede descomponerse en luces "sencillas y coloreadas" llamadas monocromáticas (violeta, índigo, azul, verde, amarillo, naranja y rojo). En la figura 3.13 se muestra el espectro de difracción de la luz blanca.

Los estudios llevados al cabo por los investigadores biomédicos han precisado el tipo de fotorreceptores contenidos en el ojo. Estos se clasifican en bastones y conos. Los bastones son 500 veces más sensibles que los conos y están encargados de la visión con los niveles más bajos de la luminosidad nocturna, así como los conos sirven para la visión diurna. Las mediciones de las longitudes de onda de absorción máxima de estos receptores confirman la existencia de tres tipos de conos; cada uno contiene un pigmento con una absorción máxima localizada respectivamente en las partes azul, verde y roja del espectro visible (aproximadamente a 0.44, 0.53 y 0.67 μm), de aquí que sean estos los colores primarios. Un juego de los tres colores primarios seleccionados correctamente basta para reproducir por mezcla todos los otros colores posibles. Teóricamente, el número de mezclas obtenidas con tres colores es tanto más grande que los colores distintivos entre ellos. Así mismo, ninguno de los tres colores primarios resulta de la combinación de los otros dos. Los colores secundarios son los que resultan de la mezcla de dos colores primarios.

En la figura 3.14 se muestra esquemáticamente el círculo cromático con un triángulo equilátero inscrito en el que cada vértice es un color primario y en cada lado está el correspondiente secundario. En el centro del círculo se encuentra el gris, que resulta de la mezcla de un color y su complementario, el cual es el color posicionado exactamente enfrente del color en cuestión. Así, son complementarios el rojo y el cian (azul-verdoso), el verde y el magenta, el azul y el amarillo.



Figura 3.17
Espectro cromático de difracción de la luz blanca.

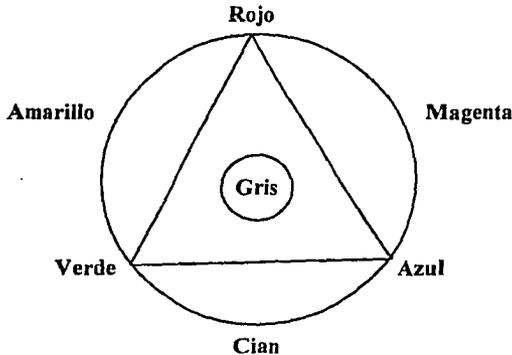
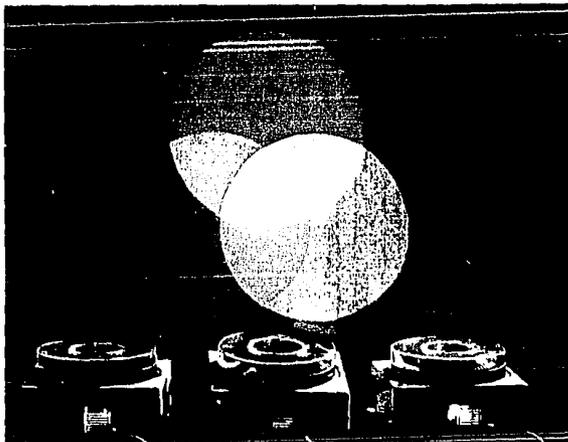


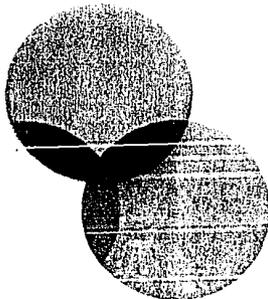
Figura 3.14
Círculo cromático

Los colores pueden ser obtenidos de dos maneras, por síntesis aditiva o por análisis sustractivo. La primera se basa en el principio de reconstrucción de la luz blanca por proyección en la oscuridad sobre una pantalla negra, de tres haces luminosos de los colores primarios (figura 3.15). Generalmente, un color cualquiera se conseguirá sobre la pantalla por la modulación de la intensidad de los tres colores. Este método es el que se utiliza en los televisores a color, en donde en un extremo del cinescopio existen tres "cañones", uno para cada color primario, y así los colores en la pantalla se generan según la intensidad de cada cañón del cinescopio. El principio del análisis sustractivo consiste en que el haz luminoso de una luz blanca cruza sucesivamente varios filtros coloreados en amarillo, cian y magenta, quienes interceptan su color complementario, es decir, el filtro amarillo impide el paso del azul, etc. Si los tres filtros son saturados, los tres componentes primarios de la luz blanca están totalmente absorbidos, quedando únicamente el negro a la salida de los tres filtros. Este principio es utilizado en fotografía, imprenta offset, pintura, etc. Como en el caso de la síntesis aditiva, el nivel de saturación de los tres filtros permite la conservación de los componentes deseados de la luz blanca y obtener así a la salida la señal de un color cualquiera.

Para efectuar un análisis numérico del color de un objeto es necesario conocer las coordenadas de dicho color en un sistema de referencia, en este caso el azul, verde, rojo (A, V, R). Sea un color cualquiera C definido por sus coordenadas (α, v, r) . Se supone que estas tres cantidades pueden tomar valores enteros entre 0 y 255, cifrando 8 bits a cada valor. Por ejemplo, tómesese el color $C(156, 227, 70)$. El análisis de C nos lleva a lo siguiente: la proporción del color verde es la más importante, siendo esta $227/255$. Entonces el tono primario dominante es el verde. Como la proporción de azul no es despreciable ($156/255$), este verde tendrá un poco de cian, entonces se puede definir a C como un verde-cian.



SINTESIS ADITIVA



ANÁLISIS SUSTRATIVO

Figura 3.15
Métodos de obtención de colores

Por otro lado, los porcentajes de colores primarios son importantes, lo que nos permite decir que el color será bastante claro. Su descomposición numérica es la siguiente:

$$C = (156, 227, 70) = (70, 70, 70) + (86, 157, 0)$$

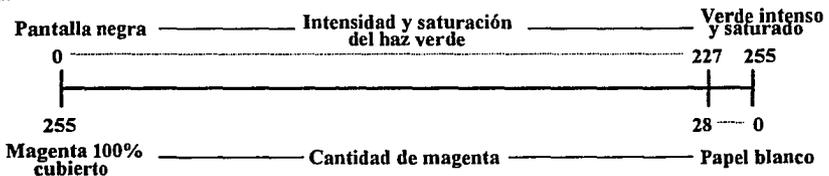
con $(70, 70, 70)$ que corresponde al gris o cantidad de blanco que aclara el color (colores primarios en igual intensidad dan gris),

$$C' = (86, 157, 0) = (86, 86, 0) + (0, 71, 0)$$

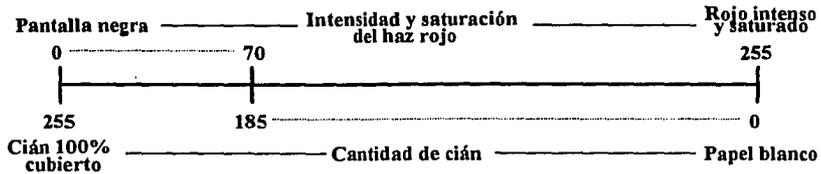
donde $(86, 86, 0)$ es un cian puro (azul y verde en igual intensidad sin rojo) y se aprecia que la tonalidad dominante es verde en un $(71/255) \cdot 100\%$. Como los colores secundarios están perfectamente complementados por los primarios, un color de coordenadas (a, v, r) en el sistema (A, V, R) , tendrá coordenadas $(255-a, 255-v, 255-r)$ en el sistema referencial (A, M, C) -Amarillo, Magenta, Cian-. En el ejemplo, el color C tendrá coordenadas $(99, 28, 185)$ en el sistema (A, M, C) . Se puede representar la correspondencia entre la síntesis aditiva sobre una pantalla negra y el análisis sustractivo sobre papel blanco de la siguiente forma gráfica y tomando como ejemplo al color C (Cuadros 3.1, 3.2 y 3.3).



Cuadro 3.1
Relación entre síntesis aditiva y análisis sustractivo para el azul



Cuadro 3.2
Relación entre síntesis aditiva y análisis sustractivo para el verde



Cuadro 3.3
Relación entre síntesis aditiva y análisis sustractivo para el rojo

Los aparatos que obtienen estos coeficientes en laboratorio son los **microdensitómetros** que permiten medir la densidad óptica de una película o de un documento para cada color primario (A, V, R), o (A, M, C) o Blanco y Negro. El **espectrofotómetro** permite un análisis espectral de la señal luminosa, de un filtro coloreado o de un documento.

Volviendo al procesamiento de imágenes a color, el principio es el mismo que para el procesamiento en blanco y negro (B & N), la única diferencia es que se asocia un color y no una intensidad de gris, a cada valor numérico.

Para obtener un procesamiento de este tipo es, ante todo, necesario disponer de una **paleta** ordenada de colores. La mayoría del software utiliza una tabla de colores llamada **arco iris** porque incluye todos los colores del espectro en orden creciente de longitud de onda: violeta, índigo, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Pero puede definirse una tabla de colores propia siguiendo cualquier orden con los colores deseados. El problema será entonces la interpretación; deberá mantenerse a la vista una escala de colores como referencia para poder ordenar y luego analizar la información.

Todos los tipos de procesamiento descritos anteriormente se aplican en la misma forma que para la visualización en B & N. La escala de gris utilizada en ella es evidente en su definición y en el orden adoptado. Se puede interpretar instantáneamente a ojo y no es necesaria una leyenda para comprenderla. Al contrario, la interpretación de un canal visualizado en una tabla de colores precisa cierta experiencia y a menudo la visualización de la escala de colores para poder interpretar algunos fenómenos. Existe además un paso obligatorio por colores más oscuros o más claros, de acuerdo a los matices, lo que no facilita la interpretación.

La visualización simultánea de varias bandas es posible en síntesis aditiva de colores. Basta proceder como en el caso de la visualización en B & N escogiendo en primer lugar 3 bandas de la misma imagen y asociándolas a cada uno de los tres colores primarios: azul, verde y rojo. El número máximo de bandas visualizable es, desde luego, tres. En el caso de SPOT, las tres bandas están predefinidas. Falta por asignar los colores a ellas. Para elaborar una **composición en colores (CC)** de una imagen SPOT multispectral, se asigna en general el azul a la banda XS1, el verde a la banda XS2 y el rojo a la banda XS3. Se visualizan las tres bandas en síntesis aditiva:

- la banda XS1 en niveles de azul (que van del negro al azul intenso pasando por una gama ordenada de azules),
- la banda XS2 en niveles de verde,
- la banda XS3 en niveles de rojo.

La visualización de las tres bandas en bruto en una síntesis aditiva en la pantalla no es evidentemente la óptima; debe adaptarse la dinámica de cada una de ellas. Desde luego que es posible efectuar cualquier tipo de adaptación de dinámica en cada una de las bandas que integran la composición en colores.

En numerosos sensores remotos se encuentran las tres bandas que corresponden a los sectores de longitudes de onda del verde, rojo e infrarrojo cercano (clasificados en orden creciente):

- Para el *HRV* de SPOT se trata de las bandas XS1, XS2 y XS3.
- Para Landsat MSS, bandas MSS4, MSS5 y MSS7.
- Para Landsat TM, bandas TM2, TM3 y TM4.

Como el color *infrarrojo cercano* no existe, no es posible asociar a cada banda el color correspondiente a su sector de longitudes de onda. Una composición en colores clásica consiste entonces en "desplazar" estos sectores de longitudes de onda y asociarles los colores primarios en el orden de clasificación correspondiente a su longitud de onda (azul, verde, rojo). Se trata de hecho de un simple deslizamiento en un lugar del espectro de colores, respetando el orden lógico de las bandas:

Sectores de longitud de onda	Color asignado
<i>Verde</i> —————→	<i>Azul</i>
<i>Rojo</i> —————→	<i>Verde</i>
<i>Infrarrojo cercano</i> —————→	<i>Rojo</i>

A este tipo de CC se le llama **composición en falso color**. Desde luego, es posible cualquier otra asignación de colores. En el caso de una imagen SPOT multiespectral, la selección de bandas es impuesta dado que hay solo tres, pero se pueden de todos modos permutar los colores, afectando por ejemplo XS1, XS2, XS3 a los colores respectivos rojo, azul y verde. Falta todavía interpretar visualmente los colores de una composición de este tipo. Es teóricamente posible construir $3! = 6$ composiciones en colores diferentes con una imagen SPOT XS. Para una imagen Landsat TM (de 6 bandas), existen 120 CC posibles ($6!/3!$), pero muchas de ellas son semejantes.

Dado que la composición en colores se efectúa mediante síntesis aditiva de los colores, es relativamente fácil descomponer sus diferentes elementos en "cantidades" relativas de colores básicos azul, verde y rojo, y remontar así hasta una estimación relativa de la respuesta de cada elemento en las diferentes bandas que forman la CC. Se llega así a recrear un símil de sello espectral y a proponer una hipótesis acerca del carácter del elemento estudiado.

En caso de una composición en falso color de una imagen SPOT XS, una parcela de color rojo vivo corresponde a una superficie con baja reflectancia en las bandas XS1 y XS2 (a las cuales han sido asignados los respectivos colores azul y verde) y una fuerte reflectancia en la banda XS3 (a la cual se ha asociado el rojo). Conociendo el sello espectral típico de la vegetación, esta parcela debe corresponder a una cubierta vegetal con actividad clorofílica en la fecha de la toma de la imagen. Si además se conocen la región y el calendario agrícola, se puede deducir la posible ocupación del suelo.

3.4.2.1.3

FILTRADO ESPACIAL

Una imagen contendrá información en un rango amplio de frecuencias espaciales. Transiciones graduales de claro a oscuro dentro de una imagen pueden interpretarse como componentes de baja frecuencia.

Variaciones locales rápidas de contraste representan información a frecuencias más altas. Es posible efectuar un análisis de las frecuencias espaciales presentes en una imagen digital, utilizando técnicas que involucren transformadas de Fourier. El hecho de filtrar una imagen tiene que ver con varias técnicas diseñadas para aislar los diferentes componentes espaciales de una imagen. Transformaciones de Fourier en una o dos dimensiones revelará una gran componente de baja frecuencia, correspondiente a la variación gradual de intensidad de la escena; así mismo pueden existir "picos" de alta frecuencia que indiquen estructuras o detalles periódicos en la imagen.

Existe una amplia variedad de filtros, pero son algo complejos, por lo que no serán abordados en el presente trabajo, sin embargo, a continuación se detallará un tipo de filtrado que se realiza en las imágenes llamado **filtro pasa-altas** y que se utiliza para remover de la imagen las componentes cuya variación es pequeña y por tanto, retiene solamente las variaciones locales de alta frecuencia en la imagen procesada. Esta técnica se usa en el análisis de la estructura superficial de un objeto y en detallado de imágenes locales. Es muy útil en cartografía cuando se desea representar la topografía local a detalle así como la estructura superficial y no se tiene interés en cambios graduales de la superficie.

Computacionalmente, el filtrado pasa-altas se efectúa con un algoritmo eficiente que resta un promedio de movimiento local de cada valor de intensidad de pixel individual. Se entra una ventana rectangular de altura H y ancho W en un pixel localizado en la línea l , columna c . Así, la ventana va de la línea l_1 a la línea l_2 y de la columna c_1 a la columna c_2 , donde

$$\begin{aligned} l_1 &= l - H / 2 \\ l_2 &= l + H / 2 \\ c_1 &= c - W / 2 \\ c_2 &= c + W / 2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

el filtrado se efectúa restando de cada pixel una intensidad promedio dentro de la ventana y luego ajustando los valores de la intensidad de salida para que caigan alrededor del punto

medio de una escala digital de grises. Para un sistema de 8 bits e intensidades (b) entre 0 y 255,

$$(b_{sal})_{l,c} = 128 + \frac{(b_{ent})_{l,c} \sum_{j=1}^{l_2} \sum_{k=1}^{c_2} (b_{ent})_{j,k}}{HW} \quad (3.4)$$

donde b_{sal} = valor de la intensidad de salida o resultante del pixel localizado en la posición l,c (línea, columna)

b_{ent} = valor de la intensidad actual del pixel en la posición l,c

Una implantación eficiente de este algoritmo aprovecha el hecho de que el promedio de intensidades de movimiento no necesita ser calculado en cada pixel. Si el algoritmo trabaja secuencialmente al través de la imagen, solamente se involucrarán los valores de los pixels que entran y salen de la ventana.

Existirán problemas con los valores promedio de intensidades de movimiento de los pixels localizados en las orillas de la imagen, para lo cual se han desarrollado ciertas técnicas, las cuales se basan en (1) extender la imagen artificialmente más allá de la frontera real repitiendo los valores de los pixels del borde, creando un conjunto extendido de líneas y columnas, y (2) extrapolando la intensidad de la imagen cerca de los bordes, basándose en el comportamiento de algunos pixels en esas regiones.

Frecuentemente se aplica un mejoramiento lineal a la imagen filtrada antes de hacer el despliegue definitivo. Un filtro pasa-altas básicamente calcula las desviaciones que existen en la imagen respecto a un movimiento medio dentro de ella. Las intensidades de los pixels tienden a estar altamente correlacionadas con aquellas de los pixels adyacentes. La imagen filtrada en pasa-altas tendrá un histograma de intensidades muy angosto. Por tal razón, la información que arroja la imagen después de ser filtrada solo puede apreciarse efectivamente aplicando algún método de mejoramiento de contraste.

Una representación gráfica del efecto del filtro pasa-altas se muestra en la figura 3.16. En la parte (a) se observa la gráfica de la intensidad digital a lo largo de una de las líneas de la imagen antes de la aplicación del filtro. La parte (b) representa la gráfica de intensidades a lo largo de la misma línea de la imagen después de haber aplicado el filtro pasa-altas. Nótese que la transición gradual de brillante a oscuro a brillante que es visible en la parte (a) no aparece en la parte (b), la cual ilustra la retención de altas frecuencias solamente o fluctuaciones rápidas de intensidades que ocurren en la línea de interés.

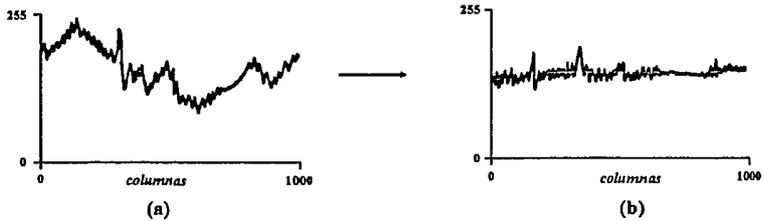
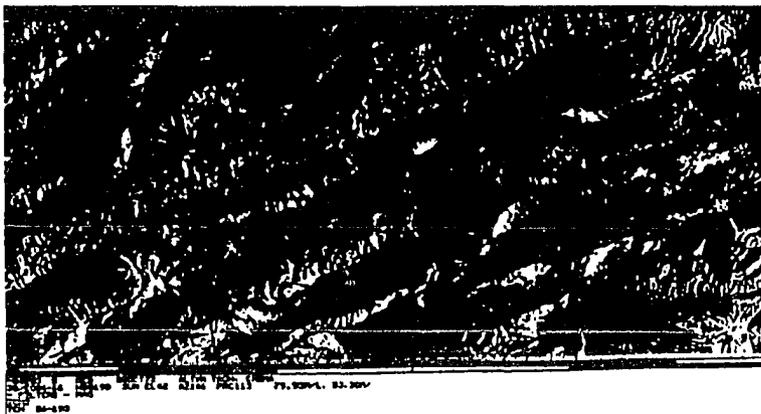


Figura 3.16
Efecto de la aplicación del filtro pasa-altas

Las figuras 3.17 y 3.18 muestran los resultados de aplicar el filtro pasa-altas a una imagen Landsat de la región china de Altyn Tagh. La figura 3.17 es una versión con mejoramiento lineal de una componente espectral de la imagen. El mejoramiento del contraste ha saturado algunos de los pixels en blanco o en negro dentro de algunas áreas específicas de interés. Esta imagen se utilizó en un estudio de estructura de fallas tectónicas, y una falla particularmente significativa que corre casi en diagonal de la parte superior derecha a la esquina inferior izquierda de la imagen no fue desplegada de manera óptima para su interpretación geológica. La figura 3.18 muestra la misma imagen después de filtrarse en pasa-altas y de mejorar su contraste. La falla de interés está ahora claramente visible, así como los detalles de otras estructuras locales que no eran distinguibles anteriormente.



Figura 3.17
Imagen Landsat de Altyn Tagh antes de filtrarse



Fuente: ambas imágenes: Barrett y Curtis, 1982

Figura 3.18
Imagen Landsat de Allyn Tagh filtrada con pasa-altas

3.4.2.2

TECNICAS CUANTITATIVAS

Esta parte del trabajo describe técnicas de procesamiento de imágenes que se aplican de manera no interactiva. Dichas técnicas están basadas en algunos modelos matemáticos y los resultados del proceso con ellas serán aceptables si el modelo está correcto. Por tal razón, estas técnicas son llamadas cuantitativas en lugar de subjetivas, dado que el proceso subjetivo normalmente involucra el ensayo y error, y una evaluación subjetiva del producto final por parte del analista; las técnicas cuantitativas se aplican generalmente a una o más imágenes sin la intervención del analista. Se describen las técnicas básicas de procesamiento cuantitativo de imágenes, incluyendo transformación geométrica, proyección cartográfica, corrección por distorsión radiométrica, clasificación multispectral y manipulación de colores.

3.4.2.2.1

TRANSFORMACIONES GEOMETRICAS

Todas las operaciones descritas anteriormente no modifican el tamaño o la forma de la imagen. El mejoramiento del contraste, el filtrado pasa-altas y demás procesos, modifican el valor de la intensidad de un pixel en particular, la posición del pixel no cambia como resultado del proceso.

Las operaciones de procesamiento de imágenes en las que se modifica el tamaño y la forma de la misma se llaman transformaciones geométricas. Estas pueden alterar la relación espacial entre los pixels. Un ejemplo simple de una transformación geométrica es la ampliación de una imagen en un factor entero (evidentemente mayor que 1). La figura 3.19 muestra el resultado de ampliar un segmento de imagen de dos renglones y cuatro columnas por un factor de 2. La ampliación se realiza copiando cada pixel 4 veces, por lo tanto se crea un segmento de imagen de 8 renglones por 4 columnas conteniendo 4 veces el número de pixels que la imagen original. Este parece ser un ejemplo muy trivial, pero hay circunstancias en las que este tipo de ampliación es muy útil.

14	27	9	15	$\times 2$	→	14	14	27	27	9	9	15	15
26	28	8	19			14	14	27	27	9	9	15	15
						26	26	28	28	8	8	19	19
						26	26	28	28	8	8	19	19

Figura 3.19
Ampliación de un segmento de imagen

La manipulación geométrica usualmente involucra más que una simple ampliación de la imagen. Un ejemplo más complejo de una transformación geométrica es la proyección cartográfica de una imagen que fue tomada en un ángulo oblicuo con relación a la superficie normal al centro del campo de visión de la cámara. En este caso, la imagen debe realinearse cambiando la relación espacial entre los pixels de manera que el producto final presente los pixels en una proyección cartográfica estándar, como puede ser la de Mercator. La proyección de una imagen rectangular tomada de una superficie esférica (planeta) es no lineal y su proyección cartográfica requiere de un cierto grado de realineamiento dentro de la imagen. La relocalización de los pixels dentro de la imagen está en función de su ubicación dentro del campo de visión del dispositivo de rastreo. En algunas regiones del campo de visión, los pixels deben moverse más que en otras áreas para lograr así posiciones correctas cartográficamente proyectadas de cada uno de ellos. Este efecto se ilustra en la figura 3.20.

Se requieren dos definiciones básicas para efectuar una proyección geométrica:

1. Debe estar definida la relación geométrica entre pixels en las imágenes de entrada y de salida; esta definición establece la transformación geométrica que será realizada. Para cada pixel en la imagen de salida (procesada), su ubicación dentro de la imagen de entrada (enviada por el satélite) debe estar definida.
2. En el caso más general de transformaciones geométricas, la ubicación de los pixels en la imagen de entrada no cae en posiciones exactas, es decir, no corresponde a ningún pixel en la imagen de salida. Debe establecerse un mecanismo para determinar los valores de intensidad que serán asignados a los nuevos pixels en la imagen de salida. Este mecanismo normalmente involucra a algún método para interpolar intensidades.

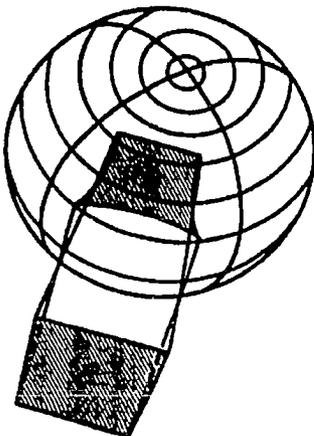


Figura 3.20
Relocalización de píxeles dependiendo de su posición en la Tierra

Estas dos definiciones fueron fácilmente determinadas para el caso de la amplificación de la figura 3.19. El factor de amplificación, 2, estableció el posicionamiento espacial y la asignación de intensidades se basó en la copia de los valores de intensidad para cada píxel de la imagen de entrada.

La técnica que generalmente se utiliza para la transformación geométrica de imágenes digitales involucra una definición de la reubicación espacial de los píxeles al través del uso de puntos referenciales. Los puntos referenciales son píxeles para los cuales su desplazamiento entre las imágenes de entrada y de salida se define en forma precisa. Para cada punto referencial, la ubicación en coordenadas renglón y columna en ambas imágenes se conoce perfectamente. Las relaciones con los puntos referenciales pueden obtenerse de distintas maneras. Para una amplificación simple, los cuatro píxeles de las esquinas de la imagen de entrada sirven como puntos referenciales, y el grado de amplificación determina la ubicación de dichos píxeles en la imagen de salida (y el tamaño de dicha imagen). La amplificación de una imagen de 3 renglones por 3 columnas, en un factor de 2, conlleva a una imagen de salida de 6 renglones por 6 columnas, y la transformación de los cuatro puntos referenciales de las esquinas se define con la siguiente tabla:

Número del punto de referencia	Coordenadas en la imagen de entrada (renglón, columna)	Coordenadas en la imagen de salida (renglón, columna)
1	(1, 1)	(1, 1)
2	(1, 3)	(1, 6)
3	(3, 1)	(6, 1)
4	(3, 3)	(6, 6)

Tabla 3.1
Modificación de coordenadas en una imagen

En el caso más general, una transformación geométrica se define dividiendo la imagen de entrada en una serie de cuadriláteros; las cuatro esquinas de cada cuadrilátero sirven como un conjunto de puntos referenciales que definen la transformación para tal cuadrilátero. Este procedimiento se ilustra en la figura 3.21. Para un cuadrilátero dado, las coordenadas (renglón, columna) de los cuatro puntos referenciales en las imágenes de entrada y de salida se conocen:

Número del punto de referencia	Coordenadas de la imagen de entrada (renglón, columna)	Coordenadas de la imagen de salida (renglón, columna)
1	(l_1, c_1)	(l_1, c_1)
2	(l_2, c_2)	(l_2, c_2)
3	(l_3, c_3)	(l_3, c_3)
4	(l_4, c_4)	(l_4, c_4)

Tabla 3.2
Generalización del cambio de coordenadas en una imagen

La imagen de salida se crea secuencialmente renglón por renglón y columna por columna. En cada coordenada (renglón, columna) de dicha imagen, (l, c) , la ubicación en la imagen de entrada, de donde se tomará el píxel, se calcula usando interpolación bilineal:

$$l' = a_1 l + a_2 c + a_3 l c + a_4$$

$$c' = a_5 l + a_6 c + a_7 l c + a_8 \quad (3.5)$$

donde los coeficientes a_i se obtienen resolviendo el sistema de ocho ecuaciones con ocho incógnitas, que resulta de la definición de los valores conocidos de (l, c) y (l', c') en los puntos referenciales de las esquinas para cada cuadrilátero.

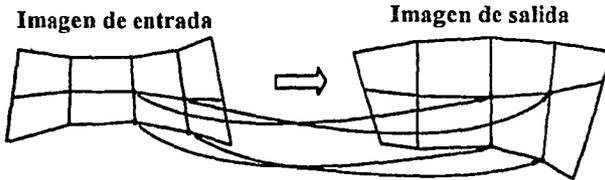


Figura 3.21
Caso general de una transformación geométrica

Las coordenadas de ubicación de un pixel en la imagen de entrada (I, c'), calculadas con las ecuaciones (3.5), normalmente no corresponderán a la posición de un pixel de la misma imagen. En general, (I, c') caerá entre 4 pixels de la imagen de entrada, como se muestra en la figura 3.22. Debe desarrollarse una técnica para determinar el valor de intensidad del pixel que será asignado a la posición (I, c) de la imagen de salida.

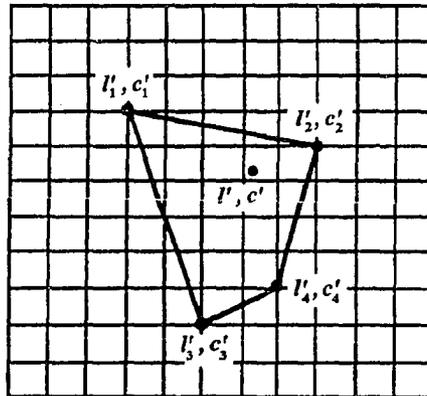


Figura 3.22
Parte del procedimiento para corregir geoméricamente una imagen

La técnica más simple de interpolación es la del **vecino más cercano**. La intensidad que se asigna al pixel en la imagen de salida es la del pixel más cercano al colocado en (l, c') en la imagen de entrada:

$$b_{l,c} = b_{\text{pixel más cerca a } (l,c')} \quad (3.6)$$

Esta interpolación puede implantarse usando las facilidades de la aritmética entera de la mayoría de los computadores digitales.

La interpolación bilineal es una técnica que utiliza los valores de la intensidad de los cuatro pixels más cercanos al que se está calculando. La intensidad del pixel ubicado en (l, c) en la imagen de salida se calcula por:

$$b_{l,c} = k_1 l' + k_2 c' + k_3 l' c' + k_4 \quad (3.7)$$

donde los coeficientes k_i se determinan del sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas que resulta al conocer las intensidades de los 4 pixels vecinos y sus coordenadas (renglón, columna). En la figura 3.23 se muestra con detalle la relación entre los cuatro pixels vecinos y la ubicación del pixel (l, c') .

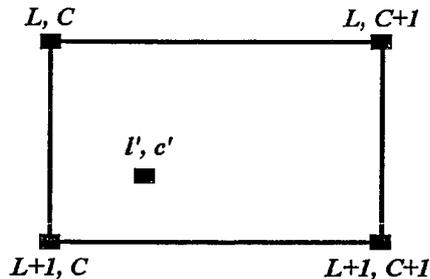


Figura 3.23
Ubicación de un pixel respecto a sus vecinos más cercanos

Existen otras técnicas más sofisticadas para la transformación de intensidades. La interpolación de **convolución cúbica** utiliza las intensidades de los 16 pixels más cercanos e interpola el valor de la intensidad de los pixels de la imagen de salida. Esto está basado en un modelo de degradación de la resolución que ocurre cuando se crea una imagen digital muestreada; tal degradación es del tipo $\text{sen}(x)/x$, por lo que esta técnica ajusta la función $\text{sen}(x)/x$ a los 16 pixels más cercanos de la posición (l, c') . El valor de la intensidad del pixel

en (f, c) se determina con base en la superficie de ajuste. La convolución cúbica trata de modelar la distribución de intensidades como existía en el objeto antes del muestreo digital, para determinar exactamente los valores de intensidad correctos para asignar a los pixels interpolados. La precisión de la convolución cúbica requiere significativamente de mayores recursos computacionales que las técnicas de interpolación bilineal o del vecino más cercano.

Las transformaciones geométricas son ampliamente usadas para efectuar proyecciones cartográficas. El objetivo es transformar la imagen a una proyección de mapa estándar. Esto es deseable porque gran variedad de bases de datos geográficamente referenciadas que no utilizan imágenes se utilizan conjuntamente con imágenes de sensoramiento remoto. El transformar una imagen digital a una proyección cartográfica estándar permite al analista tratar con los datos de la imagen sobre un marco de referencia coordinado bien conocido (como lo es el sistema geográfico de latitudes y longitudes). Es posible alinear una imagen tomada remotamente con algún sistema computarizado estándar de mapeo una vez que la imagen se transforma a una proyección cartográfica. Además, se vuelve más sencillo alinear otras bases de datos de registros geográficos con las imágenes. Por ejemplo, una base de datos que contenga información sobre elevaciones o sobre campos magnéticos puede estar disponible para un área dada; estas bases de datos pueden referenciarse o indexarse por coordenadas (latitud, longitud), y sería difícil usar imágenes para suplir dicha información sin antes alinearlas a un sistema de coordenadas geográficas estándar.

Existen algunas situaciones en las cuales es deseable correlacionar las imágenes teledetectadas con un sistema de coordenadas geográficas, pero imposible efectuar la proyección cartográfica de la imagen digital. Lo anterior pudiese ser posible por las siguientes razones: (1) La degradación en la resolución que acompaña a la transformación puede dificultar el análisis posterior de la imagen. (2) La correlación precisa puede ser imposible debido a la falta de puntos de referencia geográfica identificables que ayudarían a controlar la transformación. Un ejemplo de esta situación es el uso de imágenes satélite para análisis del clima. Es imposible identificar características terrestres en las imágenes del clima debido a la pobre resolución espacial y a la oscuridad que producen las nubes sobre la superficie de la Tierra. Además, este tipo de imágenes es extremadamente crítica respecto al tiempo y lo que se tarde en transformarse digitalmente la imagen podría hacerla obsoleta. Es también importante conocer la ubicación geográfica de los patrones de clima y las estructuras nebulares a ser analizadas.

Es estos casos puede ser recomendable dejar la imagen digital tal y como aparece en el sensor remoto y deformar los datos geográficos para ajustarlos a la misma imagen. Este tipo de proceso usualmente requiere menos recursos computacionales que la rectificación de una imagen y el registro de datos geográficos sobrepuestos a la imagen generalmente puede hacerse con unos pocos pixels de inexactitud.

3.4.2.2.2 CORRECCION DE LA DISTORSION RADIOMETRICA

Muchos sistemas de cámaras y películas para barridos introducen una distorsión radiométrica en las imágenes digitales que producen. Hay usualmente dos factores que contribuyen a dicha distorsión. Una cámara perfecta responderá a la luz dentro de un rango particular de intensidades y producirá valores de intensidad digital que estarán relacionados linealmente a la intensidad de luz del objeto real. Muchos barredores de imágenes (scanners) responden de manera no lineal siendo este el primer factor que provoca la distorsión radiométrica. El segundo factor que puede ocasionar distorsión radiométrica es la falta de uniformidad espacial al momento en que el dispositivo remoto responde a los diferentes niveles de luz; distintas regiones dentro del campo de visión de la cámara responden en forma distinta a la misma intensidad de luz que les entra.

Estos dos efectos se ilustran en la figura 3.24. Las dos curvas muestran los valores de intensidad digitizada que resultan de captar un incremento lineal de la intensidad de luz para un cierto sistema de adquisición de imágenes. Las curvas representan dos diferentes ubicaciones dentro del campo de visión de la cámara; el punto *A* está en la esquina superior izquierda y el punto *B* en la esquina inferior derecha del campo de visión. Pueden haber muchas razones de la no-linealidad hacia la intensidad de la luz y de la variación espacial en la respuesta a la luz que entra al dispositivo.

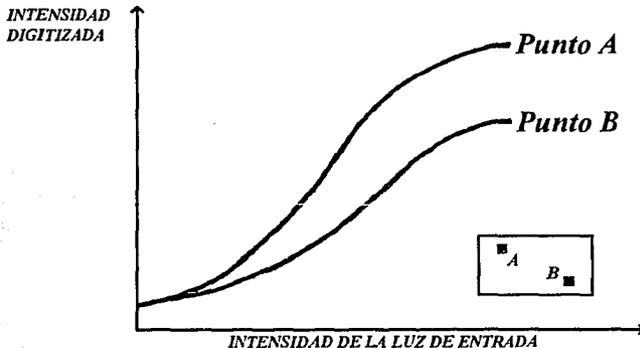


Figura 3.24
Diferencias de intensidades en dos puntos distintos del campo de visión de una cámara

Es necesario remover este tipo de distorsión antes de efectuar el análisis de la imagen. Existen varios tipos de modelos matemáticos que se usan para caracterizar estas distorsiones. Estos modelos varían en complejidad y precisión, y requieren recursos de cómputo para su implantación. Todos ellos proveen mecanismos para remover la distorsión radiométrica en una imagen digital.

La técnica de corrección más simple involucra el uso de una *plantilla de corrección* que se aplica a cada imagen. Se obtiene una caracterización amplia del sombreado espacial registrando una imagen captada con una intensidad uniforme a un nivel de luz cercano a la parte media del rango dinámico del sensor. El marco digitizado sirve como una plantilla para remover las sombras. Se calcula la brillantez promedio para toda la imagen, y el valor de la intensidad de un pixel en cada punto se hace proporcional al valor promedio. Los valores de proporción son invertidos y multiplicados por los valores de los pixels en posiciones correspondientes en otra imagen digitizada, producida por el mismo sensor.

Es posible desarrollar modelos más complejos de respuesta radiométrica registrando una serie de imágenes en las que el valor de intensidad de luz se vaya incrementando. Cada una de ellas será tomada con el campo de visión uniformemente iluminado. El resultado de este proceso es una gráfica de valores de brillantez contra intensidad de entrada para cada pixel. Si se toma una serie de siete o nueve imágenes de esta manera, puede generarse una tabla con siete o nueve entradas para cada pixel, relacionando intensidad digital con intensidad de entrada real. Pueden aplicarse una variedad de técnicas de interpolación dependiendo de la precisión deseada en la corrección. Dicha interpolación producirá valores digitales de intensidad modificados en cada pixel, que estarán linealmente relacionados a la intensidad radiométrica.

3.4.2.2.3

CLASIFICACION MULTIESPECTRAL

El término de imágenes multiespectrales se refiere a la adquisición de datos de la misma área en distintas bandas espectrales. Es posible extraer información si se dispone de datos en más de una componente espectral. La mayoría de las técnicas de extracción de información se basan en el análisis de las propiedades de reflectancia espectral de la imagen y emplean algoritmos especialmente diseñados para el análisis espectral.

La **clasificación multiespectral** es una técnica ampliamente usada para clasificar el material de una escena original basada en el análisis de las propiedades espectrales relativas de varios materiales de la escena. Se utiliza en aplicaciones como agricultura, geología y usos de suelo, así como inventario de recursos naturales.

La figura 3.25 ilustra las propiedades espectrales relativas de cuatro materiales superficiales comúnmente observados en imágenes remotas de la Tierra. Se aprecia la reflexión espectral relativa de los materiales con la luz normal del sol, en un cierto ángulo de observación. La marga tiene una baja reflexión relativa en la región espectral que se muestra

y ese valor es casi una constante a lo largo de ella. La alfalfa, por otro lado, exhibe baja reflexión hasta aproximadamente $0.65 \mu\text{m}$ y de ahí experimenta un cambio brusco hacia altos niveles de reflexión. Esto hace posible distinguir ambos materiales examinando sus propiedades de reflexión relativa. También se muestran en la figura las cuatro bandas espectrales del sistema Landsat MSS. Este sistema obtiene el equivalente a cuatro imágenes de la misma área, donde cada una de ellas representa la reflexión relativa promedio en una de las cuatro bandas. Un sólo pixel en una imagen Landsat puede estar representado por un vector de cuatro componentes, en el cual cada componente es el valor de la intensidad digital derivada de una de las cuatro bandas espectrales de la imagen. Un análisis de las intensidades relativas a lo largo de las cuatro bandas puede usarse para identificar un material particular ubicado en pixels determinados. Por lo tanto, es posible clasificar los datos de una imagen en varios grupos analizando el comportamiento espectral de cada pixel. Si se conocen las propiedades espectrales de los materiales de interés, puede hacerse un análisis automatizado de la imagen multispectral para clasificar cada pixel ya sea como perteneciente a uno de los materiales, o bien, a una clase desconocida.

Como ejemplo de clasificación, supóngase que solamente se usan las bandas 5 y 6 del Landsat MSS para distinguir entre los cuatro materiales mostrados en la figura 3.25. Es posible identificar el centroide de la reflexión relativa dentro de cada una de las bandas para los cuatro materiales y graficarlos teniendo en el eje horizontal la banda 6 y el vertical la banda 5 (figura 3.26).

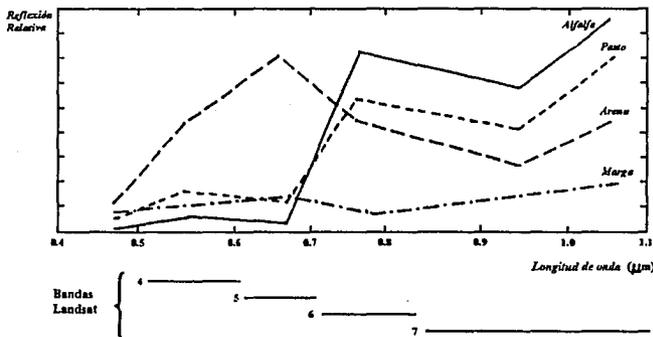


Figura 3.25
Curvas de reflectancia para cuatro distintos materiales

La marga, como ya se hizo notar, tiene una reflexión relativa baja y casi constante en ambas bandas. Esto origina un punto en la esquina inferior izquierda de la figura 3.26. La alfalfa tiene una baja reflexión en la banda 5, pero muy alta en la banda 6; el centroide resulta lejos del eje horizontal pero cerca del vertical. En la figura 3.26 se observan los cuatro centroides de lo cual se concluye que es sencillo distinguir a los materiales con base en sus propiedades espectrales.

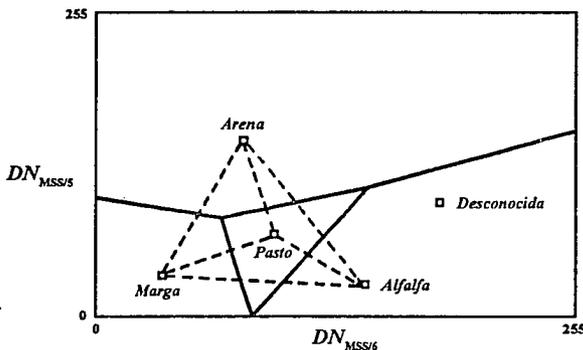


Figura 3.26
Comparación entre dos de las bandas Landsat de cuatro materiales

Se efectúa una clasificación multispectral de la imagen analizando cada pixel y determinando si la respuesta espectral exhibida por el pixel corresponde al grupo de respuestas espectrales predeterminado de los materiales conocidos. En la figura 3.26 se han dibujado las fronteras de decisión para delinear las regiones de los materiales. Estas fronteras se establecen trazando líneas normales a aquellas que unen los centroides. Cualquier pixel cuya respuesta espectral produzca un punto dentro de la sección inferior izquierda de la figura será clasificado como marga. Pixels que den por resultado puntos fuera de cualquiera de las regiones establecidas serán clasificados como "desconocidos".

El ejemplo anterior se determinó en dos dimensiones (dos bandas espectrales), sin embargo en la práctica esto se efectúa en un espacio multidimensional. Para el Landsat MSS se utilizan cuatro componentes espectrales para realizar la clasificación, una por cada banda. Conceptualmente, los datos adicionales el área como elevaciones, campos magnéticos, etc., pueden combinarse con la imagen multispectral para ayudar en la discriminación.

Normalmente se efectúan dos tipos de clasificación multispectral. La **clasificación supervisada** es la relatada anteriormente. Un conjunto de propiedades espectrales preestablecidas es usado como base de datos contra la cual comparar la respuesta espectral de cada pixel, resultando su clasificación dentro de uno de los materiales del conjunto, o

bien de clasificación desconocida. La base de datos contra la que se compara se crea generalmente por conocimiento físico del lugar. El analista determina regiones de la escena en donde él conoce el material que existe realmente sobre el terreno. Se identifica y se etiqueta con el nombre del material cada una de estas regiones usándose el algoritmo para calcular la respuesta espectral relativa para esa subárea de la imagen almacenándose en la base de datos. Cuando el analista ha identificado todas las posibles áreas conocidas de la escena, el clasificador procede a clasificar todos los píxeles de la imagen. El número de píxeles clasificados como desconocidos puede servir como una medida de evaluación de la precisión en la clasificación.

La **clasificación no supervisada** se efectúa corriendo el algoritmo de clasificación sin alguna predefinición de clases espectrales de interés. Los datos son agrupados en un espacio multidimensional y el analista determina el significado de cada uno de estos grupos.

La técnica de clasificación basada en centroides es una simplificación de aquellas que se usan comúnmente. Es posible ajustar una elipsoide a los puntos agrupados, definiéndola a través de sus parámetros estándar (excentricidad, longitud de los ejes mayor y menor, etc.). Cuando se efectúa una clasificación, los píxeles serán asignados a una clase con base en el grado en que caen dentro de las regiones definidas por las elipsoides. Es necesario, en algunas ocasiones refinar o reajustar el esquema de clasificación modificando los parámetros de las elipsoides generadas en el espacio multidimensional. Los clasificadores operan usando varios criterios de asignación de píxeles a una clase particular. Los clasificadores típicos utilizan ajuste de elipsoides, clasificación basada en la distancia mínima a los centroides u otras técnicas.

Los resultados obtenidos de los algoritmos de clasificación multispectral son frecuentemente desplegados en forma de **mapas temáticos**. Un mapa temático se produce utilizando colores como claves y coloreando cada píxel para representar la clase a la que ha sido asignado por el algoritmo de clasificación. Un dispositivo común y corriente despliega los píxeles correspondientes a agua en color azul, cultivos agrícolas en distintos tonos de verde o café, áreas urbanas o residenciales como otros colores, etc. El mapa temático es entonces una imagen artificial producida en un registro geométrico a partir de la base de datos que surge de la imagen multispectral original, y es una manera muy útil de presentar la información resultante del proceso de clasificación.

3.4.3

DESPLIEGUE DE IMAGENES

Existe una gran variedad de dispositivos que despliegan imágenes en muchos formatos distintos. Las imágenes procesadas pueden ser vistas en un dispositivo volátil, como puede ser un monitor, el cual presenta los datos digitales en formato de video. Estos datos también pueden ser presentados en película o film (transparencias), a partir del cual puede generarse una buena variedad de productos fotográficos. Así mismo, a partir de impresoras de papel se pueden obtener imágenes partiendo de señales de video. Todos estos dispositivos se resumen en dos grupos: Volátiles y Permanentes.

3.4.3.1

SISTEMAS VOLATILES DE DESPLIEGUE DE IMAGENES EN BLANCO Y NEGRO

La arquitectura más común de los sistemas volátiles de despliegue involucran el uso de un medio de almacenamiento digital a partir del cual pueda leerse la imagen y ser convertida a un formato analógico de video para desplegarse posteriormente en un monitor de televisión. Los datos de la imagen son transferidos a la memoria local desde un computador (que puede ser un *mainframe* o algún otro tipo de equipo); la imagen se almacena dentro de la memoria de manera que pueda accederse secuencialmente, línea por línea. Cada línea de la imagen se lee y convierte a formato analógico.

Los monitores de video de computadores *mainframe* típicamente regeneran la pantalla de despliegue cada 1/30 de segundo, de manera que cada línea de la imagen es leída y convertida a formato analógico cada 1/30 de segundo. Este concepto se ilustra en la figura 3.27. En equipos tipo PC no existe este proceso de regeneración de pantalla, sino que la imagen se mantiene fija. El computador se encarga de todo el control del sistema de despliegue y maneja así mismo la interfaz con el usuario. El sistema de despliegue de imágenes usualmente opera bajo control directo de un *controlador de despliegue* el cual recibe los comandos y la imagen del procesador central, ubica la imagen en lugares apropiados dentro de la memoria de video, interpreta los comandos recibidos e inicia acciones con base en la información enviada por el computador. Este controlador también transfiere información de estatus y de otro tipo hacia el procesador central. La **memoria de despliegue de imágenes** está configurada para almacenar datos para acceso secuencial generados por el proceso de conversión de digital a analógico. Esta memoria está limitada en capacidad y sólo puede soportar un número finito de líneas y columnas de una imagen digital con un máximo de bits por pixel. Configuraciones típicas para despliegue en blanco y negro incluyen 256 líneas por 256 columnas por 6 u 8 bits, 512 líneas por 512 columnas por 6 u 8 bits y 1,024 líneas por 1,024 columnas por 6 u 8 bits.

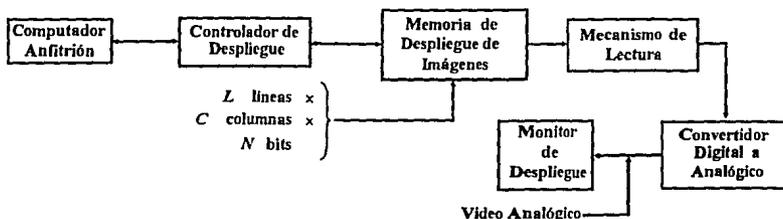


Figura 3.27

Proceso de presentación en pantalla dentro de mainframes

La memoria de imágenes puede ser vista como una pila de planos de bits. Una memoria de 512 líneas por 512 columnas de 8 bits puede pensarse que es una pila de ocho planos de un solo bit, cada uno de 512 x 512. La mayoría de los sistemas ejecuta el despliegue superponiendo los planos.

Algunos dispositivos de despliegue de imágenes permiten sobreponer gráficas o caracteres a dichas imágenes. Tal despliegue se logra añadiendo un plano extra de 1 bit el cual contiene el mismo número de pixels que los planos de la memoria de imágenes de tal manera que los datos gráficos son directamente registrados en la imagen sobre la base de pixel por pixel. En sistemas blanco y negro los bits de este plano extra llamado plano gráfico toman valores del bit más significativo de cada intensidad de pixel, de tal manera que los pixels cuyo bit gráfico (el que existe en el plano gráfico) está encendido aparece más blanco que el valor de intensidad del pixel más blanco de la imagen. En un despliegue de imágenes de 8 bits, un valor de pixel de 255 aparecerá como la intensidad más blanca, y una intensidad blanca más brillante estaría reservada para los pixels cuyo bit gráfico es igual a 1. Esto se hace para que la gráfica que se va a desplegar sobre la imagen pueda distinguirse en el caso de que pase por un pixel cuyo valor de intensidad sea 255.

La conversión de datos alfanuméricos en patrones de puntos dentro de un plano de 1 bit es efectuada usualmente con un dispositivo del computador llamado **generador de caracteres**, y la conversión de datos de vectores al patrón apropiado de puntos en un plano de 1 bit se realiza por medio del **generador de vectores**. Estos dispositivos son parte del sistema de despliegue de imágenes y se controlan al través de software para crear una gráfica deseada sobre la imagen que se va a desplegar.

Un vector está normalmente especificado en términos de las coordenadas de los pixels de inicio y fin del vector. Dadas estas coordenadas, el generador de vectores determinará qué bits prender en el plano gráfico para ejecutar el despliegue del vector. Un problema que ocurre con el despliegue de vectores es la generación del efecto de "diente de sierra" para vectores que no están alineados, ya sea vertical u horizontalmente. Los vectores que se despliegan en ángulos causarán que el algoritmo del generador de vectores efectúe algún tipo de redondeo o de interpolación del tipo *vecino más cercano*, al calcular la dirección de los bits que deben prenderse para generar el vector. Este problema es notable cuando se despliegan gráficas sobre imágenes, dado que el despliegue de imagen usualmente tiene una resolución total de 1024 pixels cuadrados.

El generador de caracteres utiliza un conjunto de patrones ya definidos dentro de la memoria de sólo-lectura (del inglés: *Read-Only Memory, ROM*) para efectuar el despliegue de caracteres alfanuméricos. La letra "a", por ejemplo, se representa por un bloque rectangular de pixels dentro de la ROM y cada vez que es requerido el despliegue de la "a" se lee el patrón apropiado de pixels para dicha letra siendo enviado al plano gráfico para su despliegue. En formato raster usualmente se emplea un bloque de tamaño mínimo 5 por 7 pixels. Los generadores de caracteres frecuentemente traen consigo diferentes alternativas de tipos de letras (del inglés: *fonts*). Esto se efectúa almacenando más de un conjunto de caracteres en ROM y accediendo al conjunto apropiado según lo solicite el usuario o el

mismo software. Es también posible almacenar otros caracteres en ROM, incluyendo caracteres extranjeros, de notación científica y de otros tipos para propósitos específicos. Algunos sistemas de despliegue pueden realizar todo esto en la memoria de acceso aleatorio (del inglés: *Random Access Memory*, *RAM*) en lugar de usar la ROM, permitiendo al usuario programar su propio conjunto de caracteres dentro del sistema y modificarlo cuando lo requiera. Todos los generadores de caracteres permiten que el despliegue de caracteres se realice en forma horizontal, aunque existen algunos más sofisticados que pueden desplegarlos en forma vertical o inclusive diagonalmente.

Existe una serie de componentes de hardware que pueden ser manejados interactivamente en el proceso de despliegue de una imagen. Cada uno de ellos trabaja de la misma manera. El usuario manipula algún dispositivo físico mientras observa la pantalla de despliegue. Evidentemente existe una correspondencia entre la manipulación del dispositivo y la colocación del cursor dentro de la pantalla. Los dispositivos de manejo del cursor más conocidos son:

- Trackball (sin traducción al español): Es una esfera que gira libremente sobre una base de rodillos perpendiculares; al desplazarse la esfera, se mueven los rodillos generando pares de coordenadas dentro de la pantalla, ubicando el cursor en ella.
- Joystick (sin traducción al español): Consiste de una pequeña palanca que puede moverse aleatoriamente dentro de ciertas restricciones físicas. También genera pares de coordenadas para posicionamiento del cursor.
- Tableta: Consiste de una tabla plana y un *apuntador*. El usuario desplaza el apuntador a lo largo y ancho de la tabla. Las direcciones vertical y horizontal de esta corresponden a las mismas direcciones dentro de la pantalla para posicionar el cursor.

La figura 3.28 muestra la arquitectura de un sistema de despliegue de imágenes en blanco y negro totalmente configurado. Los componentes incluyen la memoria de imágenes, el plano gráfico manejado por medio de los generadores de vectores y caracteres, y la interfaz que permite el manejo de componentes de hardware en forma interactiva.

Muchos sistemas están equipados con "tablas de búsqueda" (del inglés: *look-up tables*, *LUT's*) que pueden accederse directamente al través del software. Esta tabla efectúa manipulación de contrastes sobre la imagen modificando los datos de un pixel sobre la base de la LUT, después de que son leídos de la memoria de despliegue y antes de pasar por el proceso de cambio de digital a analógico. De esta manera, las manipulaciones del contraste pueden llevarse al cabo sin modificar la imagen original almacenada en la memoria de despliegue. Esto minimiza el tiempo de transferencia de datos entre el computador (si se está manejando desde un mainframe) y la memoria de despliegue, y también provee una capacidad extremadamente rápida en la manipulación interactiva de imágenes. El cambio de contraste de la LUT se lleva al cabo en cada lectura de la memoria de despliegue, de manera que los resultados de una nueva LUT se apreciarán en la pantalla inmediatamente después de que sus valores sean almacenados. El tiempo total de almacenamiento de una nueva LUT es menor a 1 segundo.

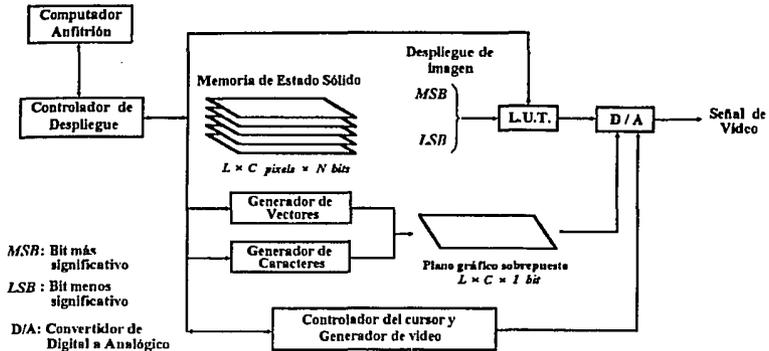


Figura 3.28

Sistema de despliegue de imágenes totalmente configurado

3.4.3.2

SISTEMAS VOLATILES DE DESPLIEGUE DE IMAGENES EN COLOR

En la figura 3.29 se muestra un diagrama esquemático de bloques de lo que es un sistema de despliegue de imágenes a color. Estos sistemas utilizan bloques separados de memoria para almacenar las componentes roja, verde y azul de cada imagen. Tres LUT's separadas hacen posible el manejo independiente de las tres componentes cromáticas de la imagen, permitiendo reales en falso color sin modificar los datos de la imagen original almacenada en la memoria de despliegue. Si se desea desplegar gráficas sobre la imagen en color, existen ahora tres planos gráficos de 1 bit que se superponen, uno para cada color. Los sistemas de despliegue en color generalmente utilizan monitores que aceptan señales analógicas de video separadas en rojo, verde y azul, llamados monitores RGB (del inglés: *Red, Green and Blue*).

La mayoría de los sistemas de despliegue en color permiten un uso flexible y dinámico de la memoria de video. La figura 3.30 muestra un diagrama esquemático de una memoria de 1024 líneas por 1024 columnas por 18 bits. Este bloque de memoria puede configurarse de distintas maneras para almacenamiento de imágenes, como lo indican las líneas punteadas. Dichas configuraciones incluyen las siguientes:

1. Una sola imagen en tres colores de 1024 x 1024 pixels.
2. Cuatro imágenes en tres colores de 512 x 512 pixels cada una.
3. Tres imágenes de 1024 x 1024 pixels cada una, o doce imágenes de 512 x 512 cada una en blanco y negro.

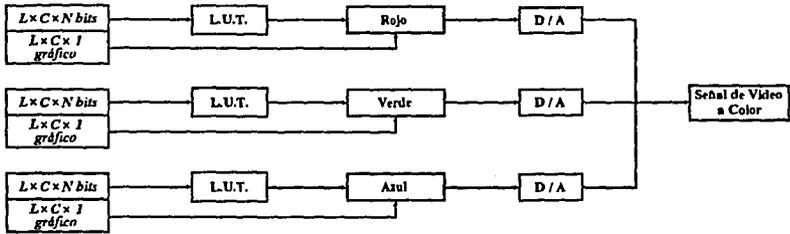


Figura 3.29
Sistema de despliegue de imágenes en color

4. Dieciséis imágenes en tres colores de 256 x 256 pixels cada una, o cuarenta y ocho imágenes de 256 x 256 pixels cada una en blanco y negro.

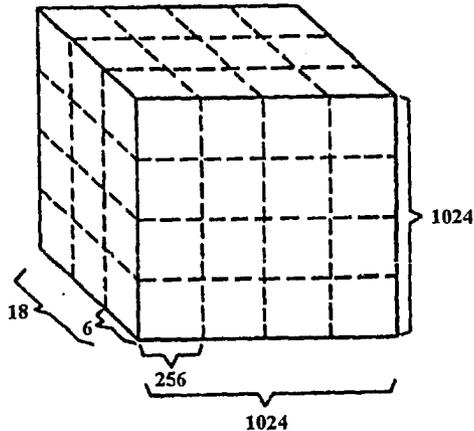


Figura 3.30
Memoria dinámica de 1024 x 1024 bytes x 18 bits

Las imágenes almacenadas en la memoria de despliegue muchas veces rebasan la capacidad del monitor en donde se van a presentar. Como ejemplo, un sistema puede configurarse con la memoria mostrada en la figura 3.30 y poder tener un monitor que solamente muestre imágenes en color de 512 x 512 pixels o menos. Un ejemplo más común pueden ser imágenes grandes (*i.e.* de 4000 x 4000 pixels) que rebasen la capacidad disponible del monitor (que normalmente está limitado a 1024 x 1024 pixels, aunque algunas estaciones de trabajo cuentan actualmente con resoluciones de 1200 x 1024 pixels como máximo). Ante esto, todos los sistemas tienen la capacidad de **extracción** (en inglés: *zoom*) y **ampliación** (en inglés: *zoom*) dentro del tamaño de la imagen completa contenida en la memoria de despliegue, cuando el monitor con que se cuenta no puede acomodarla para mostrarla completamente.

La operación de extracción consiste precisamente en extraer un segmento de la imagen en memoria, para desplegarla a la máxima resolución disponible del monitor. La función de ampliación consiste en agrandar una porción de la imagen en memoria para desplegarla. Por ejemplo, supóngase una imagen en tres colores y de 1024 x 1024 pixels en memoria, asociada con un monitor que solo puede mostrar imágenes de 512 x 512 pixels. El usuario puede desplegar la imagen completa a un cuarto de resolución en el monitor de 512 x 512 pixels y entonces ampliar una parte de esa imagen para que pueda ser desplegada en su resolución original.

3.4.3.3

SISTEMAS PERMANENTES DE DESPLIEGUE DE IMAGENES

Actualmente se encuentran disponibles varios dispositivos de bajo costo que generan copias permanentes de las imágenes que se despliegan en monitores. Estos dispositivos proveen imágenes generalmente de una calidad menor que los dispositivos volátiles o inclusive que los negativos originales producidos por sistemas de filmación. Sin embargo, se están volviendo muy populares gracias a su costo accesible y a que el usuario puede obtener una copia directa de la imagen que se esté desplegando en un dispositivo volátil sin tener que esperar el fotografiar la pantalla, procesar e imprimir dicha fotografía.

La figura 3.31 muestra esquemáticamente un dispositivo de obtención de copias permanentes en blanco y negro de imágenes. Este tipo de dispositivo envía la exposición de la imagen a un papel seco plateado al través de un tratamiento de calor. La entrada de datos es una señal analógica estándar en blanco y negro. El usuario sólo tiene que oprimir un botón para obtener esa copia permanente. El tiempo promedio de exposición y desarrollo del proceso de obtención de la copia es de aproximadamente 8 segundos. Tales aparatos proveen copias desde 16 hasta 32 tonos de gris diferentes.

Estos dispositivos operan moviendo un segmento de la imagen del video a una estación de exposición al mismo tiempo en que corre el papel. La imagen completa es registrada cambiando el segmento de la posición de despliegue, conforme al movimiento del papel. Un sistema de este tipo utiliza un arreglo lineal de fibra óptica para transferir un segmento o ventana de la señal de video a la posición de exposición.

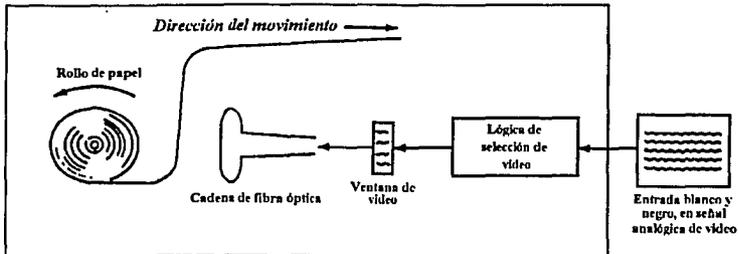


Figura 3.31
Dispositivo de impresión de imágenes digitales

En la figura 3.32 se muestra una imagen del hemisferio occidental de la Tierra tomada por el satélite GOES dentro de la banda infrarroja, el 26 de febrero de 1993, y en la que se aprecian diferentes niveles de densidad de nubes, desde el azul marino (sin nubes) hasta el blanco (cantidad máxima de nubes). La imagen es una cortesía del Servicio Meteorológico Nacional y fue impresa en láser a color con los equipos propiedad del Servicio.

Nota: Como se mencionó al inicio del capítulo, la mayor parte de los conceptos, tablas y figuras de este capítulo fueron tomados de Green, 1983 y Lillesand, 1986.

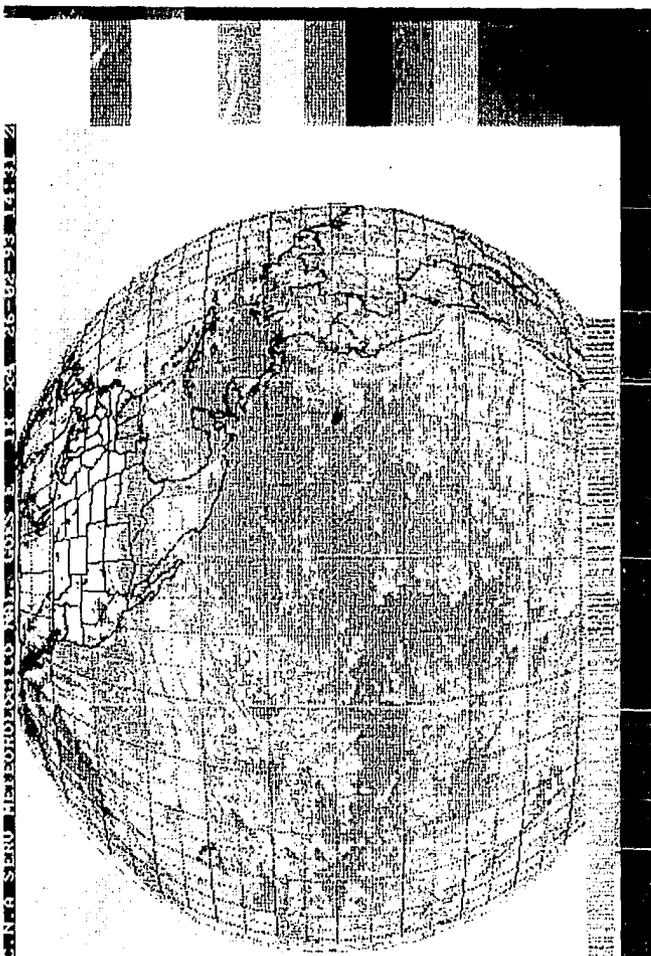


Figura 3.32
Ejemplo de la imagen tomada por un satélite meteorológico

4. APLICACIONES A LA PLANEACION

4.1

INTRODUCCION

La percepción remota, así como el proceso de imágenes digitales, tiene un campo de aplicación en constante crecimiento. Es frecuente encontrar nuevos grupos interdisciplinarios de trabajo que los utilizan para investigaciones que hace unos 25 ó 30 años ni siquiera eran imaginables. La Meteorología y la predicción del tiempo han sido precursoras dentro de las aplicaciones primarias. La investigación de otros planetas ha llevado a esta herramienta hacia un desarrollo vertiginoso. Varios centros de investigación realizan gran cantidad de estudios de todo tipo con la percepción remota, entre los que se cuentan: análisis y predicción del clima, contenido de agua en el ambiente, suelos y formaciones geológicas, rocas y recursos minerales, ecología, conservación y manejo de recursos, cultivos y usos de suelo, construcción de ciudades, catástrofes y desastres naturales, etc.

Dentro de las aplicaciones a la Planeación, como ayuda para un desarrollo metodológico, la percepción remota surge como una posibilidad de prospección dentro del inventario de recursos. Es realmente difícil seguir un proceso de monitoreo de problemas, sobre todo por la dinámica tan ágil que esto supone. Aunque la tendencia es a la baja, el aún elevado costo de las imágenes no hace muy rentable tal proceso en plazos cortos, sin embargo, es perfectamente factible adoptar una postura prospectiva y utilizar percepción remota como base para fundamentar decisiones a mediano plazo.

4.2

PERCEPCION REMOTA Y EL MEDIO AMBIENTE HUMANO

El medio ambiente humano es en parte natural y en parte hechura del hombre. Independientemente de que el foco de atención sea una simple estructura rural o una gran conurbación, es ahí donde se encuentra la mayor parte de las características no naturales del medio ambiente, dado que el hombre interviene en gran medida organizando el uso y manejo de tales características para bienestar de sus semejantes.

Dado que las escalas en el mundo construido por el hombre son generalmente más pequeñas que aquellas del medio ambiente natural, la percepción remota satelital se encuentra aún limitada por la resolución espacial, característica favorable con la que cuentan las fotografías aéreas; sin embargo, se verá que ya se han utilizado de manera significativa imágenes de Landsat y SPOT para analizar asentamientos humanos en áreas urbanas e industriales.

4.2.1

ESTRUCTURAS RURALES

En primera instancia puede considerarse a la percepción remota como una ayuda en la construcción de mapas topográficos. Una fotografía aérea puede ser analizada para revelar cambios rurales que impacten en la economía de una región. Las demarcaciones de parcelas son también importantes parámetros del cambio de la cultura y economía rurales. Distintos tamaños y patrones de parcelas pueden encontrarse relacionados con las distintas comunidades étnicas, o bien, con características del suelo en esos terrenos. Las reformas agrarias (por ejemplo, después de un cambio de gobierno) pueden mostrar cambios significativos en la distribución de las parcelas, siendo la percepción remota un excelente medio de monitoreo por el cual pueden supervisarse los cambios establecidos.

El uso de la percepción remota en lo que respecta a las vías de comunicación existentes dentro de una zona rural (carreteras, vías férreas y canales navegables) está más restringido, dado que las principales rutas ya se encuentran mapeadas. Aún más, las alteraciones de este tipo de redes están usualmente controladas por el gobierno, por lo que los cambios pueden incorporarse a los mapas topográficos y de rutas sin necesidad de datos adicionales de otras fuentes.

Sin embargo, la percepción remota cumple un papel vital en proyectos de ingeniería para la construcción de nuevas vías de comunicación. El uso de tales reconocimientos aéreos está en constante expansión, sobre todo en países en desarrollo en los que existen fuertes necesidades de combinar alta exactitud de proyectos con velocidad en su desarrollo. Las fotografías aéreas y los barridos infrarrojos son utilizados en la percepción remota comercial para apreciar las condiciones del suelo con propósitos de planeación de infraestructura de transporte.

Usando estos tipos de datos, conjuntamente con procedimientos ya establecidos de evaluación del terreno, es posible valorar ciertos factores que afectan el costo de distintos trazos alternativos y diferentes metodologías de construcción. Aunada a sondeos del terreno en sitios seleccionados, la evaluación de las condiciones superficiales en localidades clave puede extenderse a lo largo del trazo propuesto, teniendo un especial cuidado de rasgos que pudieran ser significativos en la práctica ingenieril, como estabilidad de taludes, erosión, hidrología, etc. Los inventarios de materiales naturales (como agregados pétreos) utilizados en la construcción de carreteras y vías férreas pueden ser importantes si dentro de los criterios de selección de trazos se establecen condiciones económicas por las características del terreno.

El uso de fotografías aéreas en otros proyectos de Ingeniería Civil ya no es solamente un sueño futuro; por ejemplo, se han utilizado por varios años con éxito en el desarrollo de servicios de distribución de agua. Tales fotografías proveen indicaciones inmediatas de poblaciones a servir, de las distancias involucradas y de los usos del suelo dentro del área de servicio. La percepción remota provee tal vez el método más práctico y económico con el cual pueden evaluarse las pendientes altimétricas, la disposición de las tuberías planeadas y la correcta ubicación de plantas de bombeo y redes eléctricas. En los Estados Unidos los estudios con fotografías aéreas se utilizan para localizar de manera óptima largas tuberías y líneas de transmisión de alto voltaje, así como la ubicación de torres de transmisión de microondas (Barrett y Curtis, 1982).

Por último, es posible mapear agrupaciones rurales en forma de asentamientos o comunidades, desde fotografías aéreas en estudios de exploración en áreas donde no existe aún exploración del terreno, como puede suceder en regiones amazónicas, en Nueva Guinea, etc. Inclusive pueden ubicarse tribus en regiones tropicales antes de tratar de establecer contacto directo con ellos. Es posible realizar estudios similares para construir una escena realista del movimiento de poblaciones rurales que todavía cambian de lugar por los cultivos en medio ambientes tropicales húmedos. Imágenes de radar pueden complementar las fotografías visuales e infrarrojas para tales propósitos dado que existe una alta incidencia de nubosidad en los trópicos.

En lo que se refiere a las imágenes de radar mencionadas en el párrafo anterior, conviene mencionar lo siguiente (Trevett, 1986): todas las ondas electromagnéticas están polarizadas, es decir, una vez que se propagan continúan moviéndose en un cierto ángulo medido en dirección de un plano estándar de referencia (a menos que fuerzas externas modifiquen ese ángulo). Cuando las ondas de radar son transmitidas horizontal o verticalmente y son recibidas en el mismo ángulo, se dice que están *polarizadas igualmente*. Si se reciben en distintos ángulos, se dice que tienen *polarización cruzada*. En áreas rurales, que tienen características frecuentemente recurrentes con elementos del medio ambiente, las superficies planas, esquinas y composiciones inusuales de materiales se combinan para producir señales de radar diferentes si vienen de construcciones humanas que si vinieran de elementos naturales.

En general, señales con polarización cruzada arrojan imágenes con granos más gruesos en una fotografía que las de igual polarización, pero bajo ciertas circunstancias algunos objetos en el medio ambiente rural se aprecian más claras en ellas. Por ejemplo, el detectar y monitorear redes de comunicación se realiza más fácil y exactamente utilizando polarización cruzada cuando las redes atraviesan transversalmente la ruta de vuelo. En imágenes con igual polarización, los mejores resultados se obtienen cuando sus componentes se encuentran paralelas a la dirección del vuelo. Por lo tanto, el sistema más eficiente parece ser aquel en el cual puedan evaluarse ambas componentes. La aplicación más evidente y útil de este tipo de sistemas está en la elaboración de mapas topográficos en países en desarrollo. Es posible también que, con mejoramientos adecuados a la imagen, puedan investigarse sistemas viales urbanos con estos medios, haciendo referencia a sus materiales superficiales.

4.2.2

AREAS URBANAS

Aunque los centros urbanos permiten las más grandes concentraciones de comodidades para vivir y trabajar, también presentan varios problemas que requieren ser atendidos por el hombre. Tales problemas pueden ser clasificados en internos (es decir, los relacionados con el contar con viviendas aceptables, redes de transporte eficientes y fuentes de empleo), y externos (relacionados más bien con el mantenimiento de una saludable relación de una ciudad con otra, así como entre ciudades como un sólo grupo). Se sugiere que se lleve al cabo un monitoreo de algunos de los problemas contemporáneos de las ciudades según el siguiente esquema:

- a) Las razones para la fundación y crecimiento de las ciudades y su historia evolutiva.
- b) Los procesos de competitividad y conflictos para arreglar y desarreglar el uso del suelo y las distintas áreas funcionales dentro de la ciudad.
- c) Las escalas, complejidades y patrones de concentración de actividades dentro del medio urbano.

Hoy en día existe un interés generalizado en el desarrollo de sistemas urbanos de información para la comparación, interrelación y utilización de los datos urbanos como una fuente más de información. Los geógrafos y los planeadores urbanos ya reconocen los datos de percepción remota como una parte vital del total de información con que se cuenta. Los datos obtenidos por percepción remota contribuyen a elaborar, en particular, información de dos tipos:

- a) *Fenómenos estáticos*. En esta información se incluyen aspectos relacionados con el tamaño de la ciudad; número, capacidad y localización de vialidades; tipos y tamaños de edificios; y características de distintas zonas (*i.e.* industrial, residencial, comercial).
- b) *Fenómenos dinámicos*. Esta parte de la información incluye variables que no pueden ser observadas directamente, ya sea porque cambian rápidamente, o porque no son físicamente visibles, por ejemplo, estadísticas poblacionales, datos de flujos de tránsito, condiciones socioeconómicas, etc.

Para ilustrar el valor de la percepción remota como una fuente importante de datos para sistemas urbanos de información, baste mencionar el estudio hecho en 1989 sobre el monitoreo del crecimiento urbano de la ciudad de São Paulo en Brasil, en el que se utilizaron imágenes TM del satélite Landsat-5, a partir de las cuales se generó un mapa a escala 1:100000 que muestra las áreas urbanizadas desde 1974 hasta 1987, acompañado de un análisis de crecimiento urbano (Gasparello, *et al.*, 1989). Existe un estudio de cambios en el uso del suelo hecho en el estado de Ohio en los Estados Unidos, que refleja la aplicabilidad de las imágenes Landsat a este tipo de propósitos (Giddings, 1983).

En lo que se refiere a subregiones urbanas y la estructura interna de las ciudades, el propósito es identificar, clasificar y evaluar rasgos y áreas importantes de los componentes dentro de cada ciudad, de manera que sus funciones y las actividades asociadas puedan ser comprendidas en una mejor forma. Los pasos para analizar las subregiones de una ciudad pueden resumirse como sigue:

- a) Localizar los rasgos, estructuras y áreas principales con apariencia y características similares. Estas pueden incluir zonas de oficinas, conjuntos residenciales, centros comerciales, complejos industriales, centros de transportación, etc. La interpretación de fotografías aéreas, imágenes satélite e imágenes de radar han sido muy útiles para estos propósitos.
- b) Clasificar los rasgos, estructuras y áreas principales dentro de un número adecuado de categorías que sirvan para sistematizar su mapeo. La figura 4.1 ejemplifica el mapeo urbano utilizando fotografía aérea. Actualmente existen en desarrollo clasificaciones supervisadas que están basadas en imágenes Landsat MSS para este propósito, las cuales se aplican ampliamente.
- c) Contar y/o medir atributos estáticos importantes y físicamente visibles del área urbana, por ejemplo, tamaño y área de subregiones y subáreas, número y dimensión de edificios, y elementos de los sistemas de transporte.
- d) Generar y comparar datos de fenómenos urbanos dinámicos para los cuales existen evidencias dentro de las imágenes y, por lo tanto, son susceptibles de ser inferidos, dado que es obvio que no pueden ser apreciados directamente en la imagen. Estos "sustitutos" de la información se utilizan, por ejemplo, en análisis de datos de fotografías aéreas e imágenes de radar a gran escala, para diferenciar zonas residenciales en términos de clases socioeconómicas o bien, densidades de población y su relación con la calidad de vida.
- e) Deducir información y calcular índices para representar rasgos dinámicos urbanos para los que existe evidencia clara y visible, esto es, distribución y hábitos de estacionamiento de vehículos, disponibilidad de suelo para desarrollos, etc.

Se han utilizado imágenes SPOT como una herramienta para constituir un mecanismo en tiempo real de los cambios que se producen en el uso del suelo, principalmente en las áreas de protección ecológica y espacios verdes, en las de expansión urbana y zonas de cultivos. Existe un estudio hecho sobre la ciudad de Quito, Ecuador en 1989 cuyo objetivo es el de establecer un mecanismo de control de cambios en el uso del suelo de la zona urbana (Solís, 1989).

Santos (1993) hace una buena presentación de casos y estudios urbanos utilizando percepción remota, entre los que se encuentran el ya mencionado monitoreo de expansión urbana de São Paulo, detección de cambios en el uso del suelo en París con imágenes SPOT, estudios comparativos hechos con fotografías aéreas e imágenes SPOT y Landsat TM sobre la ciudad de Washington, D.C., etc.

4.2.3

SISTEMAS DE TRANSPORTE

La fotografía aérea ha sido utilizada con éxito durante muchos años en el campo de estudios de transporte. En los Estados Unidos, un estudio sobre organización de las principales autopistas ha revelado que casi tres cuartas partes de ellas han utilizado inspecciones aéreas al momento de planearlas. Son cuatro los tipos de estudios a los que se enfoca la percepción remota (Bush and Collins, 1974):

1. *Planeación de caminos.* Los ingenieros se han basado en reconocimientos fotogramétricos para analizar datos cualitativos y cuantitativos, especialmente al inicio del proceso de diseño de rutas. Por ejemplo, se han localizado por aire bancos de materiales para construcción de caminos.
2. *Estudios de tráfico.* El uso de fotografías aéreas se ha extendido para determinar con precisión áreas y causas de congestión de tráfico, así como para proveer información de flujos de vehículos para el diseño futuro de vialidades y generación de cursos de acción inmediatos para aliviar los problemas de congestionamiento vehicular.
3. *Evaluación de la distribución de estacionamiento.* La fotografía aérea puede revelar lugares donde las concentraciones de automóviles tienden a crecer, y dónde pueden ubicarse posibles áreas para estacionamientos vehiculares.
4. *Inspección de carreteras.* Es posible, al través de estudios aéreos, evaluar el estado de la superficie de rodamiento de las carreteras y así analizar zonas para mejoramiento de pavimentos.

Aunque los datos obtenidos al través de satélite son generalmente muy burdos para estudios de transporte, se ha estudiado la aplicabilidad de los sistemas de observación de este tipo, llegándose a las siguientes conclusiones:

- a) En lo que se refiere a información sobre una red de transporte, es aconsejable utilizar sistemas de sensores multiespectrales, capaces de proveer datos con resoluciones hasta de diez metros, de manera que sea posible localizar enlaces físicos de la red, así como instalaciones terminales de la misma.
- b) Los fenómenos de flujo y sus problemas asociados requieren de imágenes infrarrojas y pancromáticas; también es útil el radar, dando resoluciones de hasta medio metro. Es posible investigar patrones de origen-destino y flujos de vehículos diarios como un todo. Esto puede servir para estudios de diseño de rutas y control de tráfico.

- c) Para estudiar la relación entre transporte y uso del suelo, se necesitan fotografías infrarrojas, en color y pancromáticas, así como dispositivos de sensoramiento químico particularmente sensibles al fósforo y al nitrógeno. La resolución espacial óptima puede ser de un metro. Por este medio se pueden estudiar las relaciones entre la intensidad con que cambia el uso del suelo y la distancia entre carreteras y enlaces ferroviarios.

Es evidente que los rangos de resolución de imágenes propuestos anteriormente no se encuentran disponibles comercialmente en el mercado de fotografías satelitales, sin embargo, se han presentado aspectos referidos a su potencial en estudios de tránsito y transporte.

4.2.4

COMPLEJOS INDUSTRIALES

En vista del impacto económico de las industrias manufacturera y extractiva, y del papel dominante que juegan en zonas urbanas, se analizan las perspectivas de aplicación de la percepción remota en el desarrollo de estas áreas. Se contemplan tres aspectos de los componentes industriales de áreas urbanas que pueden ser vistos al través de fotografías aéreas o imágenes satélite:

1. La ubicación actual de la industria y los distintos tipos de suelo.
2. Pérdidas de calor y desprendimiento a la atmósfera y al agua, de contaminantes provenientes de algún complejo industrial.
3. Oportunidades de establecer nuevas industrias para el desarrollo de zonas con un uso industrial.

El uso de la percepción remota en el análisis de actividades industriales data de la Segunda Guerra Mundial, cuando se utilizaban fotografías aéreas para la identificación de blancos militares estratégicos y la selección de objetivos para ataques aéreos. Actualmente, la fotointerpretación de actividades industriales tiene aplicaciones específicas, no solamente al mapear áreas industriales sino al actualizar inventarios de materiales apilados. Los datos de alta resolución son esenciales para adecuar la interpretación y la evaluación de rasgos de zonas industriales. Las fotografías aéreas de áreas de industria se presentan frecuentemente a escalas mayores de 1:10000, inclusive mayores de 1:5000. Normalmente se utiliza película en color en lugar de película pancromática, tomando en cuenta la mayor definición que ofrece.

Generalmente, las plantas industriales mantienen, tanto materia prima como productos terminados, apilados al aire libre en los patios de maniobras y cuya cuantificación es muchas veces un problema que debe resolverse para la elaboración de reportes de inventarios. Dicha cuantificación puede calcularse prácticamente con la misma precisión por medio de fotografías aéreas que si se contabilizaran en la superficie, donde materiales como carbón, mineral de hierro y otros minerales, pulpa de madera y pedacera de madera son acumulados a cielo abierto. Estos materiales pueden ser evaluados de forma muy cercana desde fotografías aéreas a escalas 1:1000 y mayores. Es de esperar que exista mayor varianza en estimaciones periódicas donde las pilas de material tengan forma irregular. Sin embargo,

algunos expertos opinan que se tienen aproximaciones hasta del 2% en estimaciones aéreas, siendo que en estimaciones en tierra se tiene una aproximación de apenas el 15%. Los mismos expertos subrayan el hecho que los costos de los estudios aéreos pueden estar substancialmente por debajo de aquellos realizados en tierra. Dado que ambos métodos siguen en esencia el mismo procedimiento, pueden ser usados conjuntamente. Tal procedimiento es el siguiente (Horton, 1974):

- a) Hacer el mapa de las pilas principales con contornos cercanamente espaciados.
- b) Hacer el mapa de las partes más altas de las pilas a niveles grandes de detalle.
- c) Determinar los volúmenes de las pilas, por planimetría de áreas entre contornos sucesivos y multiplicándolas por la profundidad del material.
- d) Convertir las unidades de volumen en unidades de peso, usando los pesos volumétricos de los materiales.
- e) Ajustar las estimaciones iniciales de pesos utilizando factores de compactación (dependiendo del material que se trate).

Medidas similares pueden usarse como apoyo a industrias extractivas, por ejemplo, cantidad de material removido de una mina a cielo abierto al través de períodos seleccionados de tiempo. Los datos resultantes pueden ser de gran valor para las compañías mineras y, potencialmente, a los gobiernos que buscan medios exactos de bajo costo para monitorear empresas mineras, para efectos de cobro de impuestos por extracción.

4.2.5

CONTAMINACION AMBIENTAL

Cuando se habla de industria es imprescindible mencionar cuestiones de contaminación ambiental. Firmas comerciales de estudios de percepción remota ofrecen servicios de imágenes aéreas, sobre las que se pueden analizar pérdidas de calor. Edificios pobremente aislados térmicamente aparecen claramente evidenciados en imágenes de la banda infrarroja térmica. Por mapeo termográfico se pueden establecer valores base de pérdida de calor en cada estructura cubierta por el estudio. Una amplia gama de técnicas de percepción remota han sido probadas en la búsqueda de métodos eficientes para medir concentraciones y dispersión de contaminantes. Por ejemplo (Horton, 1974):

- a) *Fotografías en la banda visible*. Utilizadas para estudiar el comportamiento de tiros de chimeneas y la apariencia e intensificación de incendios urbanos y forestales.
- b) *Imágenes infrarrojas*. Usadas como base para estudios tan diversos como el monitoreo de erupciones volcánicas, dirección de dispersión de incendios y el seguimiento de corrientes calientes en ríos, lagos y mares.
- c) *Técnicas de microondas*. Utilizadas para rastrear derrames de aceite o petróleo en costas y/o aguas profundas.
- d) *Técnicas de proceso multispectral*. Usadas en la evaluación de la calidad del agua, a distintos niveles de penetración de la luz, en regiones seleccionadas.

En lo que se refiere a contaminación, la experiencia con imágenes Landsat se resume en tres grupos principales (Fuente: folleto publicitario de *EOSAT*):

1. *Contaminación del aire.* Existen estudios que han demostrado que las imágenes satelitales pueden detectar partículas que emanan tanto de puntos en la superficie (fuentes fijas, como pueden ser industrias), como de fuentes móviles (por ejemplo, aeronaves).
2. *Contaminación del agua.* Investigadores en esta área han podido mapear patrones de turbulencia, a gran escala, en ríos y océanos usando las resoluciones que ofrece Landsat, así como diferenciar la contaminación del agua por fuentes domésticas, municipales e industriales.
3. *Contaminación del terreno.* Han podido identificarse problemas superficiales a gran escala, incluyendo minas, materiales apilados y terrenos baldíos. Sin embargo, es en esta área donde más se resienten las limitaciones impuestas por la resolución espacial del sistema Landsat, ya que normalmente las áreas de depósito de desechos sólidos son más bien pequeñas.

Gracias a la accesibilidad, al poder discriminatorio y a la repetitividad de las imágenes SPOT, ha sido posible identificar problemas de contaminación en diversas partes del mundo. Con frecuencia, las grandes concentraciones urbanas e industriales están situadas en zonas litorales. Sus efluentes, que no siempre están correctamente tratados, dan lugar a vertidos nocivos para la fauna y la flora marina. Como ejemplo se muestra en la figura 4.2 una parte de la aglomeración de Caracas, Venezuela. En la superficie del agua, agitada por una onda del Noreste, se ve nítidamente una mancha sospechosa que comienza en la costa (Fuente: folleto publicitario de SPOT).

Mencionando, por último, la necesidad social de reordenamiento del antiguo suelo industrial, está claro que debe contarse con una escala de imagen mejor que la de cualquier plataforma satelital. El viejo suelo industrial es pobre en calidad, debido frecuentemente al resultado directo de su explotación para fines industriales, en muchos casos no es suficiente solamente saber la extensión de tales áreas, es vital el conocimiento de la calidad y naturaleza del suelo como parámetros de decisión en la planeación de un nuevo uso industrial. Los ingleses, en su país, han efectuado estudios de terrenos industriales abandonados utilizando fotografías aéreas a escala de 1:10500. Chequeos en campo revelaron que existe un alto grado de exactitud en la identificación de los distintos tipos de áreas baldías industriales, dentro de unos 200 kms. El análisis detallado de las imágenes estereoscópicas tomó aproximadamente 15 horas/hombre, contra las posiblemente 5 semanas/hombre requeridas para un estudio de campo, en la colección de los datos y su graficación en un mapa (Barrett and Curtis, 1982).

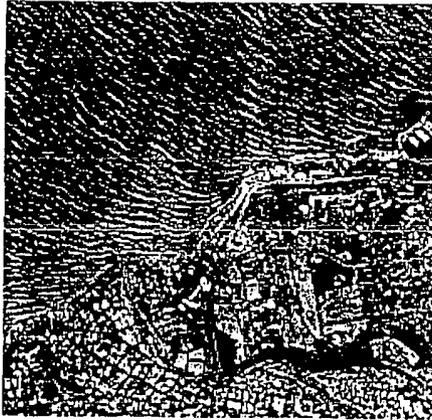


Figura 4.2
Imagen SPOT de Caracas del 4 de junio de 1986, Esc. 1:25000

4.2.6

DEMOGRAFIA Y CAMBIOS SOCIALES

4.2.6.1

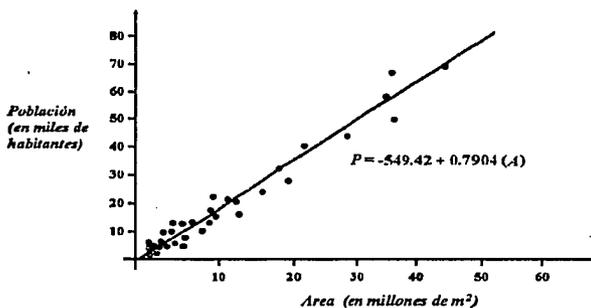
ESTUDIOS DE POBLACION

Un uso importante de los datos de percepción remota está en la estimación de la población. En países en desarrollo como la India y Nigeria, donde los censos completos pueden ser difíciles de organizar, las instancias responsables han utilizado fotografías aéreas e imágenes de satélite para clasificar asentamientos, tanto rurales como urbanos, en términos de tipos y densidades de habitación, de manera de poder hacer una mejor estimación de la población.

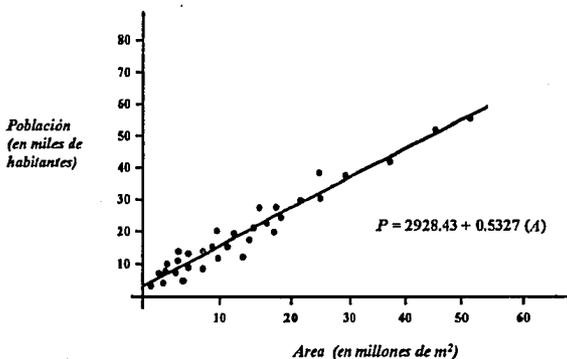
En el mundo desarrollado, las investigaciones han mostrado que la percepción remota ofrece datos muy valiosos de cambios de población durante períodos entre censos. Existe un estudio que estima la población de una zona urbana utilizando los resultados de un análisis de varios tipos de uso del suelo residencial (Kraus, *et al.*, 1974). Un estudio piloto de este tipo fue llevado al cabo en los 1960's en la región del Valle del Río Tennessee, para la cual existía fotografías aéreas desde 1953 hasta 1963 (Holz, *et al.*, 1969). Se plantearon cuatro hipótesis:

1. La población de un centro urbano está directamente relacionada con el número de ligas que tenga con otros centros urbanos.
2. La población de un centro urbano está directamente relacionada con la población de la urbe más cercana a él, con mayor población.
3. La población de un centro urbano está inversamente relacionada con la distancia a la urbe más cercana.
4. La población de un centro urbano es proporcional al área observable del espacio ocupado por tal población.

Estas hipótesis fueron probadas utilizando regresión lineal inversa. La conclusión fue que el orden de las variables independientes cambian con el tiempo, los valores de varios coeficientes difieren considerablemente y en una variable en particular (la distancia al centro urbano más cercano), ocurrió un cambio de signo en su coeficiente. Sin embargo, a pesar de estas complicaciones, los coeficientes de correlación múltiple entre la población estimada y la real, para 40 centros urbanos seleccionados, estuvo entre 0.95 para 1953 y 0.88 para 1963. Esto indicó que por arriba del 91% y del 77%, respectivamente, de la variación en la población de las áreas urbanas se explica al través de las variables independientes seleccionadas. En la figura 4.3 se muestran las gráficas de las relaciones observadas entre población y área urbana en el valle del Río Tennessee, tanto en 1953 (*a*) como en 1963 (*b*). Debido a la alta correlación entre área urbana y su población, la inclusión de las variables independientes restantes no ayuda a explicar la variación existente.



(a) 1953



(b) 1963

Figura 4.3
Relaciones entre área y población, valle del Río Tennessee

Otros estudios en Estados Unidos han tratado de estimar densidades y totales de población en áreas pequeñas, dentro de centros urbanos más grandes, usando fotografías aéreas multispectrales y datos muestrales tomados en tierra. Algunos de estos modelos se formulan como sigue (Barrett and Curtis, 1982):

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

donde Y representa el número de casas habitación, o bien, población, y x_1, \dots, x_n son variables derivadas de las imágenes, tales como el número de casas para una sola familia, el número

de construcciones multifamiliares, la distancia a centros principales de trabajo, etc. Las relaciones entre x e Y fueron desarrolladas por medio de análisis de regresión múltiple.

En la práctica, el uso de suelo residencial se identifica con fotografías aéreas a escala 1:50000, con lo que se calcula el área de residencias. Un conteo de bloque por bloque arroja el número de unidades para habitación por tipo de construcción, de acuerdo a una clasificación de cuatro categorías (unidades de vivienda de una sola familia, grupos de viviendas que albergan de 2 a 5 familias, grupos de 6 a 14 familias y grupos de 15 o más). Los coeficientes de regresión múltiple fueron 0.65 y 0.54 para el centro de la ciudad y para zonas suburbanas, respectivamente. Todo esto es alentador, pero se requieren ciertos mejoramientos para volverlo una técnica operacional, entre los que se incluyen la adquisición de imágenes en las que la cobertura que hagan los árboles no influya en la ubicación de las viviendas, además de la elaboración de datos tomados en tierra para que el modelo pueda ser validado.

Aún así, se puede concluir que la percepción remota, a pesar de presentar aspectos burdos, parece estar destinada a proveer información valiosa concerniente a cantidad de población y sus cambios, en la mayor parte de las áreas urbanas del mundo. La aplicación de esto es posible ubicarla con mayor impacto en países en desarrollo, donde las tasas de crecimiento de población y urbano son particularmente elevadas. Los datos demográficos en tales naciones son frecuentemente inadecuados para propósitos de planeación, dado que los censos nacionales son difíciles de llevar al cabo y a veces arrojan resultados inexactos (Welch, 1980).

Un concepto parcialmente relacionado con lo anterior, y de considerable importancia para las autoridades gubernamentales, es la que se refiere a calidad de vivienda. Por ejemplo, no se pueden planear soluciones a problemas en zonas urbanas pobres hasta que se han definido y localizado dichas áreas. Los métodos convencionales de acumulación de datos de distribuciones en la calidad de vivienda consumen demasiado tiempo (Moore, 1970). Una vez más las técnicas de percepción remota pueden proveer nuevos y mejores datos que los estudios en tierra y, además, con mayor frecuencia y rapidez. La tabla 4.1 muestra una comparación de zonas habitacionales en la ciudad de Austin, Texas, basada en distintos parámetros. La mayoría de estos rasgos pueden identificarse por medio de imágenes de percepción remota bajo condiciones normales de visión. Se puede evaluar la calidad de vivienda, estudiando ciertos aspectos socioeconómicos del vecindario y estimando el nivel y distribución de los ingresos familiares.

Parámetro	Clase baja	Clase media
<i>Tamaño de la vivienda (m²)</i>	42 - 136 (81 promedio)	52 - 173 (145 promedio)
<i>Distancia a la calle (mts)</i>	4 - 14	11 - 15
<i>Tamaño del terreno (m²)</i>	482	820
<i>Imagen</i>	No uniforme	Uniforme
<i>Casas con cochera (%)</i>	3	97
<i>Número de autos visibles por casa</i>	0.20	0.76
<i>Calles sin pavimento (%)</i>	65	0
<i>Ancho de calles (mts)</i>	4 - 8	8 - 11
<i>Calidad de las guarniciones</i>	Casi no hay	Intactas
<i>Vegetación</i>	Débil	Cultivada
<i>Mantenimiento de las casas</i>	Hay escombros	Sin escombros
<i>Patrón de las manzanas</i>	Irregular. Con muchos callejones	Regular
<i>Lotes vacíos por manzana/ciudad</i>	0.6	0
<i>Proximidad a otras zonas</i>	Cerca de zonas industriales. Lejos de zonas comerciales.	Cerca de comercios. Lejos de industrias.

Fuente: Davis, et al., 1973

Tabla 4.1
Estudio comparativo de zonas habitacionales, Austin, Texas

4.2.6.2

CAMBIOS EN EL MEDIO AMBIENTE CONSTRUIDO

Se ha visto como los sistemas de percepción remota pueden ser utilizados para la detección del uso del suelo tanto rural como urbano.

Sin duda, los datos obtenidos por sensoramiento remoto tienen un gran valor al analizar los cambios producidos en una cierta escena. Debe notarse también que, dado que los datos no están seleccionados, una imagen remota del medio ambiente construido lo presenta como un sistema simple, orgánicamente relacionado con espacios abiertos dentro y alrededor de él.

En vista de que las ciudades son el medio ambiente construido más significativo y poderoso que existe, a continuación se hace referencia a algunos métodos y proyectos diseñados para monitorear su crecimiento y el impacto que producen sus cambios. Aunque los datos remotos pueden ser analizados manualmente para obtener estimaciones burdas del crecimiento urbano, existe actualmente una tendencia hacia el desarrollo de procedimientos automáticos de interpretación altamente sofisticados.

Uno de los primeros proyectos más ambiciosos para evaluar la utilidad de las fotografías aéreas e imágenes espaciales para la detección del cambio en el uso del suelo, en tierras urbanas, fue el Proyecto de Censo de Ciudades, organizado por la NASA en conjunto con el Programa de Aplicaciones Geográficas (del inglés: *Geographic Applications Program, GAP*), del Servicio Geológico de los Estados Unidos (del inglés: *United States Geological Service, USGS*); originalmente se consideraron 26 ciudades para casos de prueba. El Servicio Meteorológico de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, junto con el Centro de Aeronaves Tripuladas de la NASA tomaron fotografías multispectrales de gran altitud de veinte de ellas. El año elegido para este estudio fue 1970, es decir, uno de los años en que se realizaron censos en Estados Unidos (los censos en ese país se efectúan, como en México, cada decenio). Los datos básicos de sensoramiento remoto fueron fotografías infrarrojas en color. Este tipo de película es especialmente valioso para usos sobre zonas urbanas, debido a su alta capacidad de penetración en la neblina, así como la fácil distinción entre la vegetación (que aparece roja en una imagen a colores) y los rasgos urbanos (que tienen apariencia azul). Esto es particularmente útil en ciudades que tienen una estructura urbana fuertemente mezclada entre elementos de concreto y madera. El objetivo final del proyecto fue la producción de un Atlas de Cambios Urbanos y Regionales, en el cual se incluirían varios tipos de representación de datos, entre otros, fotomosaicos, mapas convencionales, mapas impresos por computador, datos tabulares y textos.

En un estudio piloto para la ciudad de Boston, se empleó una clasificación de uso del suelo de 24 categorías. El tamaño mínimo de celda fue de aproximadamente 10 acres. Los datos de uso del suelo se procesaron por computador para hacerlos compatibles con los datos del censo de 1970. En consecuencia, pueden ser recuperados ya sea uno por uno o en combinaciones seleccionadas de zonas censadas (Barrett and Curtis, 1982).

En menor proporción, las imágenes Landsat pueden ser procesadas para obtener mapas de uso del suelo, de cambios urbanos a partir de escalas 1:250000. Para fines de planeación, la información de uso del suelo se necesita especialmente en la periferia de las zonas urbanas más que del centro. En la Gran Bretaña se han hecho estudios de expansión urbana con imágenes Landsat. Se eligió a la ciudad de Northampton para verificar qué tan útiles podían ser tales imágenes. Se revisó la exactitud de la clasificación computarizada de los datos satelitales contra datos observados y colectados en el sitio, así como contra datos obtenidos con fotografía aérea, concluyendo que más del 90% de los nuevos desarrollos que se realizaron entre 1969 y 1975 se habían identificado plenamente en las imágenes. Es claro que las plataformas espaciales pueden ser una herramienta valiosa para evaluar y mapear los cambios urbanos, aún en los países desarrollados.

4.3 SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

Ningún documento sobre percepción remota que se haya desarrollado dentro de los últimos cinco años puede considerarse completo si no incluye, al menos, un breve análisis de un tipo de sistemas que son ya indispensables en los estudios urbanos. Dado que la información obtenida con percepción remota se encuentra en formato digital, puede ser comparada e integrada fácilmente con datos digitales de otras fuentes para elaborar documentos que apoyen a la planeación. Una de estas fuentes son los Sistemas de Información Geográfica, (del inglés: *Geographic Information Systems, GIS*), los cuales conforman una nueva tecnología que se está convirtiendo, cada vez más, en una herramienta esencial para analizar y transferir gráficamente información acerca del mundo (especialmente hablando). Burrough (1986) define a un GIS como "un poderoso conjunto de herramientas para coleccionar, almacenar y recuperar, según se desee, transformaciones y despliegue de datos espaciales tomados del mundo real para un conjunto particular de propósitos".

Los GIS se utilizan para ayudar a los tomadores de decisiones indicando alternativas de planeación de desarrollo y conservación de recursos, así como un modelado de resultados posibles de escenarios, como se puede apreciar en la figura 4.3. Ofrecen a los planeadores una fuente rápidamente accesible de hechos objetivos relacionados con ciencias de la Tierra, y una herramienta veloz, económica y flexible para combinar tales hechos con otros productos para crear alternativas de decisión. Por lo anterior, es indispensable un conocimiento básico de la localidad, incluyendo cantidad y disponibilidad de recursos naturales, para una planeación racional.

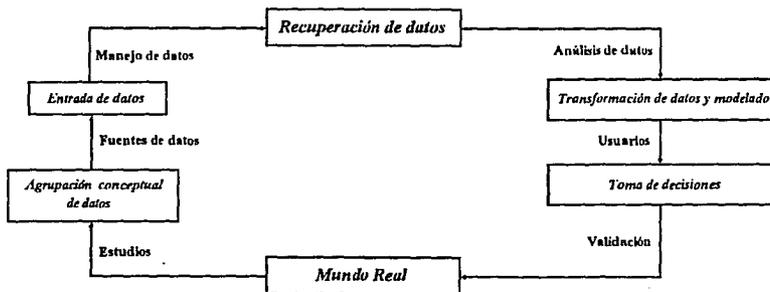


Figura 4.3
Modelado de la realidad al través de un GIS
 (Fuente: Valenzuela, 1991)

Los GIS son un miembro de una familia de herramientas que permiten a las computadoras representar fenómenos espaciales y analizar datos espacialmente relacionados. Todos los GIS integran funciones de mapeo, que despliegan mapas o rasgos geográficos con un manejador de bases de datos que organizan los atributos ligados a los rasgos de mapas. El rango de aplicaciones de los GIS en la planeación de ciudades es amplio, sin embargo, no todos los sistemas son adecuados para estos fines; por tal razón, el desarrollo de un GIS debe comenzar con una revisión comprensiva de los usos que se le quiere dar. Los GIS tienen varias aplicaciones potenciales a la planeación. En seguida se catalogan en tres grupos y se mencionan a detalle algunas de sus características (Fuente: ARC News, primavera 1991, Vol. 13, No. 2).

1) Mapeo de datos

Despliegue de datos. Esto se refiere al uso de mapas temáticos o mapas de ubicación de puntos, para realzar reportes y presentaciones, o para ayudar en el análisis "humano" de la distribución espacial de fenómenos socioeconómicos.

2) Captura de datos anteriores

Almacenado y recuperación de información del suelo. Los GIS pueden servir como archivos para datos relativos al uso del suelo, tales como propiedad de terrenos, áreas permisibles para distintos tipos de construcción, información de impuestos, etc. En este sentido, un GIS puede responder a preguntas como: "¿Quién reside en Av. Coyoacán # 874?", "¿Dónde está la parcela x?", o bien, "Despliega la historia del desarrollo de la manzana que se está apuntando en este momento en la pantalla".

Manejo de zonas y delegaciones. Un GIS puede usarse para guardar y actualizar mapas de delegaciones o municipios. En este contexto, los GIS que poseen capacidades de topología, permiten responder a órdenes como: "Despliega los usos de suelo no permitidos en la delegación x", o bien, "¿En qué municipio está la parcela x?".

Notificación. Diversas acciones de planeación requieren que los propietarios y residentes dentro de un cierto radio de un lote en particular, sean notificados de algún cambio en la zona. El trabajo de determinar cuáles lotes están dentro de un radio de, digamos, 1 km. en cierta zona, generalmente se realiza a mano y toma bastante tiempo. Un GIS puede programarse para determinar los lotes afectados por cierta restricción, produciendo un mapa detallado del área y además rotular los sobres de notificación a los propietarios.

Administración del crecimiento y de permisos. Los planeadores pueden utilizar un GIS para obtener información de lotes en construcción y el estatus de sus permisos, y así determinar rápidamente el desarrollo potencial del área y su crecimiento. Esta capacidad es crucial para una administración más efectiva del crecimiento urbano.

3) Modelado Interactivo de Datos

Selección de sitios. Pueden establecerse criterios geográficos para identificar sitios potenciales para un uso en particular. Por ejemplo, los planeadores que estén buscando un sitio en el cual establecer una escuela primaria, podrían hacer la siguiente pregunta: "¿En dónde se encuentran lotes vacíos de al menos x metros cuadrados, distantes cuando mucho y metros de un eje vial, y que tienen al menos z niños en edad escolar primaria en un radio de por lo menos 1 km.?" Nótese que esta pregunta mezcla criterios geográficos (distancia a un eje vial) con criterios tabulares (número de niños en edad escolar).

Impacto ambiental. Los GIS pueden usarse para identificar impactos en el medio ambiente geográficamente determinados. Se puede cuestionar: "¿Cuántas unidades residenciales (casas) serán afectadas por el ruido de x decibeles bajo tres posibles alternativas de desarrollo?"

Modelos de desarrollo contra factibilidad en el uso del suelo. La factibilidad para el desarrollo de ciertos lotes puede analizarse al través de establecer índices de desarrollo. Los atributos clave que se pueden examinar pueden incluir pendientes, tipos de suelo, drenaje, infraestructura disponible, etc. De igual forma, si la investigación realizada fue encaminada a factores que hacen que ciertos lotes sean más atractivos para el desarrollo, un GIS podría producir mapas de factibilidad que pudieran alertar a los planeadores acerca del desarrollo potencial antes de que este ocurra.

Modelado de redes. Por años, los planeadores del transporte han construido modelos de redes de transporte para predecir los impactos de cambios propuestos en los sistemas locales, o bien, en los usos de suelo a los que sirven dichos sistemas. Aunque los GIS basados en plataformas PC no pueden todavía soportar las zonas tan grandes y complejas que modelan los paquetes de redes de transporte, existen ciertos progresos. Por ejemplo, el análisis de redes puede utilizarse para minimizar el tiempo total de traslado de estudiantes de una escuela dentro de una localidad.

Determinación de Isolíneas. Los planeadores, generalmente necesitan dibujar contornos, isolíneas o líneas de igual valor alrededor de localidades geográficas determinadas. La orden "muestra los contornos de terrenos cuyo precio es N\$30,000 como función de su distancia al centro de la ciudad", requiere de un GIS para representar adecuadamente las distancias en el espacio, así como para ligar éstas con una base de datos de atributos.

Tanto el mapeo computarizado como el análisis espacial se han desarrollado simultáneamente en diversos campos relacionados entre sí. Su estado actual no sería posible sin la estrecha interacción de las siguientes áreas de conocimiento:

1. Mapeo topográfico y catastral
2. Cartografía temática
3. Ingeniería civil
4. Geografía
5. Estudios matemáticos de variación espacial
6. Estudios del suelo
7. Fotogrametría
8. Planeación urbana y rural
9. Redes de utilidad
10. Percepción remota y procesamiento de imágenes
11. Inteligencia artificial
12. Ciencias de la computación

Rápidamente los GIS se han vuelto una herramienta estándar para el manejo de recursos, y actualmente es difícil pensar en que se realicen estudios en planeación de recursos o mapeo de ciudades sin uno de estos sistemas o sin contemplar su implantación de alguna manera. El uso efectivo de grandes volúmenes de datos espaciales depende de la existencia de un sistema de procesamiento y manejo geográfico eficiente que transforme esos datos en información utilizable.

Es posible agrupar las aplicaciones típicas de los GIS en la siguiente forma:

- a) Cartografía automática
- b) Diseño de subdivisiones
- c) Mapeo catastral
- d) Mapeo de carreteras
- e) Mapeo y administración de instalaciones
- f) Mapeo geodésico
- g) Monitoreo de eventos (accidentes, crímenes, incendios, etc.)
- h) Creación de mapas estadísticos de censos
- h) Planeación y gestión de uso del suelo
- i) Estudios de impacto ambiental
- j) Inventario y administración de recursos naturales
- k) Sistemas de información de tierra
- l) Estudios comerciales
- m) Planeación y programación de rutas de transporte
- n) Planeación regional y urbana
- o) Selección de rutas carreteras
- p) Estudios prospectivos de ingeniería
- q) Exploración minera

Actualmente existe disponible software especializado en el análisis de la información geográfica que continuamente está mejorando en capacidad de procesamiento. La tecnología de visualización ofrece alta resolución, gran capacidad de despliegue de colores, edición interactiva y una amplia gama de características adicionales. La mayor parte de este software es muy versátil ya que manejan formatos raster, así como datos de puntos, líneas y polígonos, pudiéndose convertir de uno a otro indistintamente.

Muchos de estos sistemas de cómputo son verdaderas "cajas de herramientas" para el análisis y manipulación de información geográfica, ya que contienen una serie de utilerías que realizan funciones discretas de manera altamente eficiente. La idea es desarrollar paquetes con estructura modular, de manera que puedan servir a la mayor cantidad de usuarios posible sin necesidad de que ellos adquieran varios sistemas por separado. Actualmente, los tipos de GIS pueden ser agrupados de la siguiente forma:

- Sistemas de mapeo de ingeniería (CAD/CAM) para aplicaciones en fotogrametría, topografía e ingeniería de caminos.
- Sistemas de información de propiedades de parcelas.
- Sistemas de mapeo general estadístico y temático para manejo de recursos naturales, inventarios forestales, vegetación, geología, suelos y censos.
- Sistemas bibliográficos acerca de documentos geográficos.
- Sistemas que contienen archivos de datos geográficos relacionados con vialidades urbanas.
- Sistemas de procesamiento de imágenes.

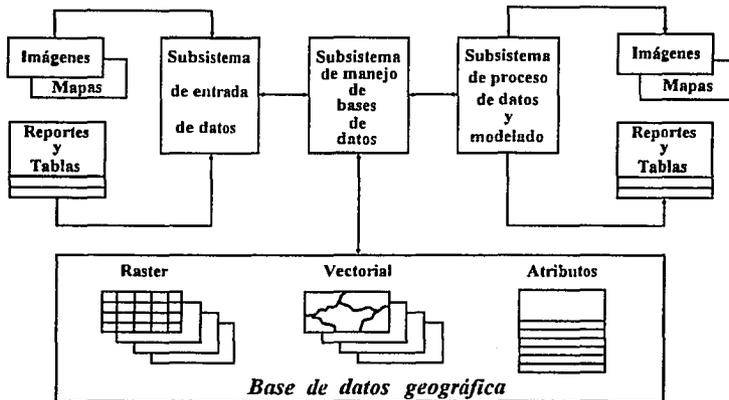


Figura 4.4
Representación esquemática de un GIS

(Fuente: Valenzuela, 1991)

Los GIS consisten de cuatro componentes principales: agrupamiento y entrada de datos, bases de datos geográficas, modelado y análisis de datos, y presentación y visualización de datos. Bryan y Zobrist (1976) propusieron cuatro criterios para considerar que un GIS es realmente útil. Estos criterios son: (1) debe proveer ubicaciones de puntos y áreas, (2) debe ser posible agregar variables individuales y agrupadas, (3) debe efectuar representaciones de arreglos espaciales de los datos, y (4) debe ser capaz de interactuar con programas de análisis estadístico y matemático. En la figura 4.4 se presenta una representación esquemática de un GIS.

4.3.1

CARTOGRAFIA Y MAPAS

Se puede considerar a un mapa en sí como un sistema de información. Es una representación, normalmente a escala y en un plano, de una selección de materiales o rasgos abstractos relacionados con la superficie de la Tierra. El término mapear se usa frecuentemente en Matemáticas para dar la noción de transferencia de información de una forma a otra, tal y como los cartógrafos transfieren la información de la superficie terrestre a una hoja de papel. También se ha usado vagamente para denotar a cualquier despliegue visual de información, particularmente si éste es abstracto, generalizado y esquemático. Así mismo, la cartografía es el arte y la ciencia de hacer mapas y cartas (nótese la diferencia entre los dos términos: **mapa** es el término genérico, mientras que **carta** se utiliza para propósitos de navegación tanto aérea como marítima). Como tal, está ligada a la geografía en lo que concierne a aspectos de la Tierra y su vida (Dueker, 1987).

Los tipos de mapas que existen pueden agruparse de la siguiente forma:

- **Cartas náuticas.** Mapas de áreas costeras y marinas que proveen información para la navegación.
- **Cartas aeronáuticas.** Proveen datos esenciales para el piloto. Son, de alguna manera, mapas topográficos en pequeña escala en las que existe información actualizada para ayudar a la navegación.
- **Mapas topográficos.** Representaciones de rasgos naturales o artificiales de partes de la superficie de la Tierra dibujados a escala. Proveen un inventario completo del terreno e información importante para las actividades que involucran el uso y el desarrollo del suelo.
- **Mapas temáticos.** Son mapas especializados que contienen información acerca de alguna característica o tema en especial. Constituyen una herramienta para comunicar conceptos geográficos tales como usos de suelo, densidades de población, campos de cultivos, formaciones geológicas, etc.

4.3.2

ENTRADA Y AGRUPACION DE DATOS

Existen métodos para un agrupamiento eficiente de datos que proveen exactitud y confiabilidad, consistentes con el nivel de aplicación de la información. El proceso usualmente involucra la interpretación de imágenes aeroespaciales, observaciones de campo, y el soporte para las fuentes de datos existentes. Los productos de la percepción remota son fuente importante de datos utilizados para monitorear y actualizar procedimientos. Las técnicas de procesamiento de imágenes proveen las herramientas para transformar en información los datos de la percepción remota.

Una entidad geográfica se define por dos tipos de datos, **geométricos** y **no geométricos**. Los primeros se relacionan con la ubicación geográfica de la entidad que se está analizando. Los no geométricos se relacionan con la información registrada (usualmente descriptiva) de dicha entidad. La transformación de estos datos geométricos a un formato compatible con computadoras digitales requiere del uso de un procedimiento de digitización. Los datos de los atributos normalmente son capturados al través del teclado (Dueker and DeLacy, 1990).

La captura de datos o digitización es una secuencia de tareas para codificar los identificadores de posición de datos espacialmente orientados. En su forma más burda, la digitización puede verse como la determinación de los valores de las coordenadas X e Y que describen la ubicación de puntos, líneas, áreas o superficies, conforme se van representando en uno o más mapas. En un sentido más amplio, digitizar es la tarea de crear un archivo de datos aceptable, libre de errores y legible por una computadora, proveniente de fuentes muy variadas, como pueden ser mapas, planos, etc.

La transformación de datos de mapas (analógico) a formatos compatibles con una computadora (digital), es una de las tareas más costosas y que mayor tiempo consumen en la creación de un GIS. La entrada de datos requiere operaciones de edición para comparar los datos digitales contra el mapa original y así corregir los errores subsecuentes inducidos tanto por el analista humano como por el hardware y el software utilizados.

4.3.3

BASE DE DATOS GEOGRAFICA

Una base de datos espacial describe una colección de entidades, algunas de las cuales tienen ubicación permanente en algún espacio global y dimensionado. Normalmente existe una mezcla de tipos de entidades geométricas y no geométricas que pueden cambiar con el tiempo. Las entidades de tipo geométrico tienen las propiedades topográficas básicas de ubicación, dimensión y forma. Las entidades no geométricas no son reconocidas al no tener ubicaciones permanentes con respecto a otras entidades. Los datos espaciales describen la ubicación y la topología de rasgos de puntos, líneas, polígonos y superficies, mientras que los datos no espaciales describen las características de estos rasgos.

4.3.3.1

BASE DE DATOS GRAFICA

La información gráfica incluye atributos, una ubicación espacial, extensión o configuración y es dinámica (cambia con el tiempo). Estos atributos geométricos pueden ser topológicos o métricos. Estos últimos incluyen posición, forma y tamaño que pueden expresarse en coordenadas espaciales. Los atributos topológicos son aquellos que describen características tales como conectividad y adyacencia que no varían bajo distorsiones y cambios de escala. Las entidades geográficas están convencionalmente divididas en puntos, líneas, polígonos y superficies. Los polígonos son, tal vez, los rasgos más utilizados en los GIS. Esencialmente, la representación computacional de entidades de punto, línea, polígono y superficie toman una de dos formas: datos cuadriculados (celulares, raster) o datos vectoriales. La estructura de datos raster consiste en una matriz de celdas de tamaño uniforme, cada una referenciada por un índice posicional único (renglón y columna). Contiene un número o código que representa el tipo de valor del atributo que se está mapeando, el cual puede ser ordinal (escalar o vector) o nominal. Una de las mayores desventajas de la organización celular es que existe mucho desperdicio de espacio de almacenamiento en una computadora para datos espaciales, aunque esto puede solucionarse utilizando algunas técnicas de compactación de datos (Burrough, 1986).

La estructura de datos vectoriales representa entidades puntuales definidas directamente por sus coordenadas, entidades de línea definidas por una cadena de coordenadas espaciadas tanto uniforme como no uniformemente, y entidades de área o poligonales definidas por sus fronteras.

Los productos de percepción remota también son parte de la base de datos gráfica, ya que hacen posible la sobreposición de estos datos con aquellos derivados del GIS. Integrando técnicas de procesamiento de imágenes con procedimientos convencionales de manejo de GIS, se crea la posibilidad de optimizar la transformación de datos en información y el mejorar la calidad de los datos para operaciones de modelado.

4.3.3.2

BASE DE DATOS DE ATRIBUTOS

Adicionalmente a la representación espacial de un rasgo, cada entidad tiene usualmente cierta cantidad de atributos que también son importantes. Estos atributos pueden ser tanto nominales, tales como nombres de los suelos, tipos de cultivos, etc., como escalares, por ejemplo tablas de profundidades acuáticas o elevación de contornos.

Un sistema de base de datos es, esencialmente, un sistema de guardado computarizado de registros, esto es, un sistema cuyo propósito general es retener datos y hacer que estén disponibles en cualquier momento. La base de datos por sí misma puede ser entendida como una especie de archivero electrónico (Date, 1986). Tales sistemas computarizados consisten de cuatro elementos principales:

- i) Datos, los que se almacenan en una o más bases de datos formando un sistema de base de datos.
- ii) Hardware, el equipo que hace físicamente posible ingresar, almacenar, recuperar y visualizar los datos.
- iii) Software, que provee a los usuarios de un conjunto de instrucciones para acceder y analizar los datos almacenados.
- iv) Usuarios, una persona o grupo de personas que usan los datos almacenados.

Las bases de datos dan facilidades para realizar varias operaciones comúnmente requeridas en manipulación de datos de atributos. Estas operaciones incluyen:

1. Adicionar nuevos conjuntos de datos a la base de datos
2. Insertar nuevos datos en un conjunto ya existente
3. Recuperar datos de conjuntos ya existentes
4. Actualizar y/o transformar datos de conjuntos ya existentes
5. Eliminar datos de conjuntos ya existentes
6. Borrar conjuntos de datos de la base de datos

El modelo en el que se sustenta un sistema de base de datos, consiste de los tipos de estructuras utilizados para representar entidades de datos y asociaciones entre entidades dentro de la base, y el conjunto de operaciones primitivas (normalmente conocido como **lenguaje de datos**) que puede utilizarse para manipular los almacenados en dichas estructuras. Existen tres modelos principales para bases de datos generalizadas: relacional, jerárquica y en red.

4.3.4

ANÁLISIS DE DATOS, MODELADO Y MANIPULACION CARTOGRAFICA

Una de las características más importantes de los GIS es su capacidad para analizar datos y modelar espacialmente. Las capacidades convencionales de análisis y manipulación de los GIS incluyen superposición de mapas, procedimientos de reclasificación, análisis de proximidad y otras técnicas de modelación cartográfica.

La superposición de mapas arroja uno nuevo donde los valores asignados a cada ubicación del mismo se calculan como una función de valores independientes, asociados con dicha localidad, en dos o más mapas existentes. La determinación de distancias involucran operaciones de medición cartográfica de la distancia, lo cual resulta en un nuevo mapa en el que la distancia y la ruta entre puntos puede expresarse como una simple distancia euclidiana.

Estas capacidades se utilizan, ya sea por sí mismas o junto con otros modelos estadísticos o de simulación, los que incluyen evaluación de tierras, agroecología, producción de cultivos, hidrología, degradación del suelo, modelos de erosión, estudios de riesgos y catástrofes, etc. Otra herramienta importante en las capacidades de análisis de los GIS es el procesamiento de imágenes. En la modelación cartográfica, el problema (modelo conceptual) a resolver es la descomposición en submodelos que puedan resolverse por separado. El modelo está estructurado de tal manera que la solución de modelos individuales pueden combinarse para obtener respuestas al modelo original (Bunn, 1984). Cada submodelo, a su vez, puede descomponerse en modelos más pequeños que pueden ser resueltos directamente. La metodología básica para efectuar un análisis de decisiones es disgregar el problema en sus componentes, permitiendo al decisor enfocarse a las situaciones críticas por separado.

4.3.5

SALIDA DE DATOS

El módulo de salida de un GIS ofrece productos que son requeridos normalmente tanto por el usuario como por el analista de datos. Estos productos incluyen mapas, gráficas, tablas, fotografías y dispositivos magnéticos. Nótese que la calidad de las imágenes de salida está en función de la calidad de los dispositivos que la realizan. Dichos dispositivos varían en cuanto a precio, desde los más económicos hasta equipos sumamente caros (entiéndase en un rango de 500 hasta 15,000 dólares americanos). En la figura 4.5 se muestra esquemáticamente el módulo de salida de un GIS.

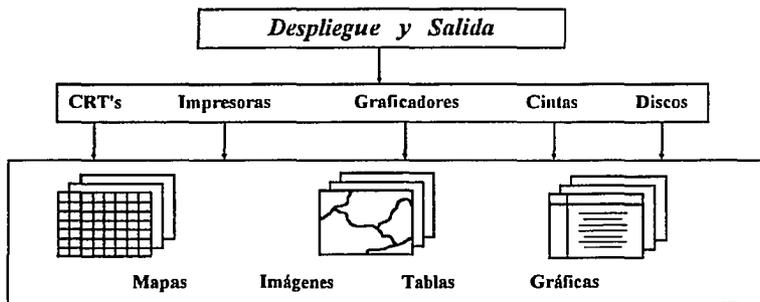


Figura 4.5
Módulo de salida de un GIS

(Fuente: Valenzuela, 1991)

Cabe hacer notar que los dispositivos de salida de un GIS son prácticamente los mismos que se utilizan con este mismo fin en el procesamiento de imágenes, por lo que el lector puede referirse a la parte final del capítulo anterior para este efecto.

4.4

EJEMPLO DEL PROCESAMIENTO DE UNA IMAGEN PARA APLICACIONES EN PLANEACION

A continuación se presenta el un ejemplo del análisis que es posible realizar de una imagen satélite con el fin de observar cómo se puede aplicar ésta a estudios de Planeación.

Se escogió para tal efecto la imagen de un lugar que pudiera tener un alto potencial de aplicaciones en Planeación, ya fuera regional, urbana, portuaria, ecológica, turística, etc.; uno de los lugares que cumple con estas características es la bahía de Acapulco. La imagen que se presenta es una SPOT multispectral en tres bandas (azul, verde e infrarrojo cercano), tomada en 1987 con una resolución espacial de 40 mts. por pixel. Desafortunadamente, la calidad de la impresión es muy inferior a la que puede mostrar un monitor a color, ya que una impresora de matriz de puntos solamente registra diez tonos de gris, siendo que la imagen en pantalla contiene 256 tonalidades diferentes de color para cada uno de los pixels. Sin embargo, para fines de ejemplificación, las imágenes que se muestran cumplen en algo al objetivo para el que fueron analizadas. El procesamiento se hizo con el Sistema Personal Interactivo de Percepción Remota (SPIPR) desarrollado por el Centro Científico de IBM, y se utilizó un computador DELL 486P/33 a 33 Mhz. de velocidad, con 8 Mb de memoria RAM y 212 Mb en disco duro, monitor de 14" diagonales, SuperVGA de 768 x 600 pixels a 256 colores.

En la imagen 1 se realizó una composición en falso color utilizando la banda 1 para el rojo, la banda 2 para el azul y la banda 3 para el verde. No tiene ninguna clase de procesamiento, es decir, se trata de la imagen en bruto, sin embargo, se aprecia en distintos tonos de lila y verde la profundidad del mar en la bahía. En tierra, se notan las zonas montañosas en verde y la zona urbana en blanco y lila.

La imagen 2 presenta un falso color en bruto pero ahora utilizando la banda 1 para el rojo, la banda 2 para el verde y la banda 3 para el azul. Es evidente que las tonalidades de colores han cambiado respecto a la imagen 1. Ahora se aprecia la zona urbana con una mayor diversificación de colores, lo que permite establecer zonas con terrenos baldíos o con construcciones. Las vialidades se han perdido un poco así como las zonas montañosas, que se ven en tonos de azul y violeta.

Procesando esta imagen al través de una ecualización del histograma con un modelo exponencial negativo, resulta la imagen 3, en la que se aprecia mucho más claramente el límite del litoral, en detrimento de la zona urbana al oscurecerse sus rasgos. Es posible hacer inferencias acerca de la orografía de la región dado que se han resaltado las partes montañosas (amarillo).

La imagen 4 presenta un acercamiento o *zoom* de la imagen 3. Nótese en distintos tonos de azul la discriminación de las vialidades, sobre todo a lo largo de la costa (vialidad conocida como "la Costera"). En distintos tonos de café y verde se aprecian los terrenos en

las laderas de los cerros que rodean el puerto. Un estudio de planeación oceanográfica a través de batimetría, podría basar algunas de sus conclusiones en esta imagen, ya que se aprecian diversos cambios de tonalidad en la zona acuática, pudiendo deberse a situaciones de gradientes de temperatura superficial del agua.

En la imagen 5 se presenta un despliegue en grises de la banda 1 habiendo ecualizado el histograma de forma exponencial positiva. Nótese cómo se encuentran definidos muy claramente algunos rasgos que en las imágenes en falso color aparecían difusos. La zona urbana se ubica perfectamente por medio de los tonos más claros de gris. Una imagen de este tipo es muy útil cuando se desean hacer estudios de expansión urbana. Las principales vialidades no están muy nítidas, por lo que un estudio de tránsito no sería posible de realizarse con esta imagen.

El efecto de profundidad en la zona montañosa a la derecha de la imagen 6 hace parecer que existe altimetría en ella, sin embargo se trata de la misma banda 1 a la que se le realizó un procesamiento por medio de la transformada de Fourier, así como una ecualización a su histograma de manera exponencial negativa. El realce del litoral hace que este tipo de proceso permita apoyar estudios costeros. La zona urbana está perdida casi en su totalidad de no ser por algunas líneas blancas que muestran las principales avenidas.

Un filtrado sobre la banda 3, una ecualización de su histograma en forma lineal positiva y un despliegue en grises descubre perfectamente la mancha urbana del puerto en la imagen 7. Es bajo este tipo de imagen que se pueden realizar estudios urbanos. Nótese las vialidades como líneas oscuras. La Costera Miguel Alemán sigue el contorno de la bahía hasta desaparecer a la derecha como camino hacia el aeropuerto. El centro de la ciudad se encuentra al lado izquierdo, donde se nota una mayor concentración urbana. Un detalle de lo anterior se aprecia en la imagen 8, un acercamiento de la imagen 7 en el que, debido a la baja resolución espacial, no es posible discernir entre las manzanas de la ciudad, sin embargo esto da idea de lo que es posible realizar con un adecuado procesamiento de las imágenes.

El análisis de estas imágenes es tan sólo una muestra de la aplicación que puede tener el procesamiento de imágenes dentro de áreas específicas de la Planeación. Sin embargo, es necesario aclarar que, la utilización del procesamiento en forma única, hace difícil una aplicación directa. Posiblemente se requiera de otra herramienta para soportar en forma más sólida los resultados que se infieran de esto: un Sistema de Información Geográfica, datos obtenidos en campo, fotografías aéreas, etc.

**IMAGENES SPOT
DE LA BAHIA DE ACAPULCO
ESTADO DE GUERRERO, MEXICO**



Imagen 1
Falso color en bruto con una cierta distribución de bandas

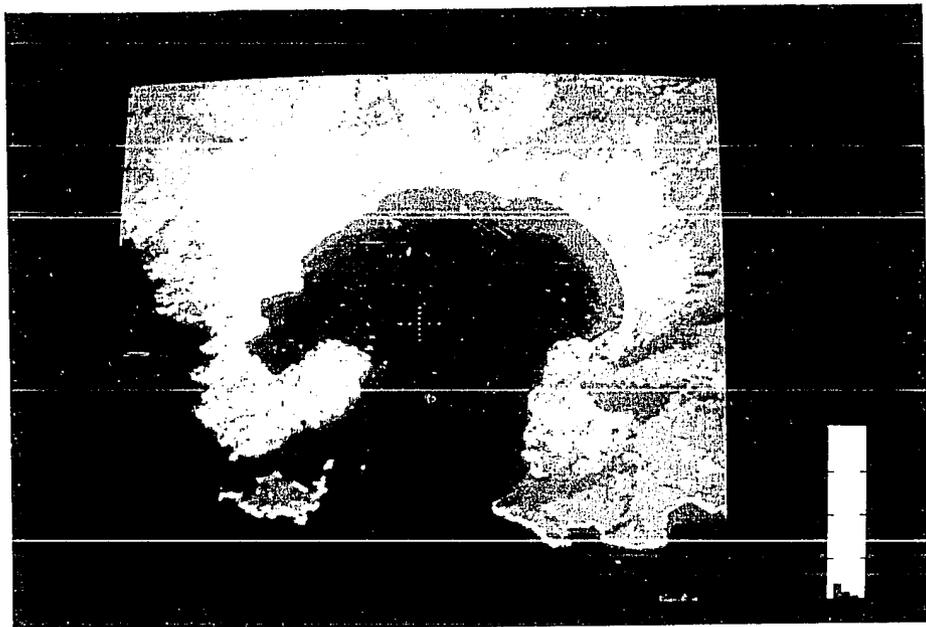


Imagen 2
Falso color con otra distribución de bandas

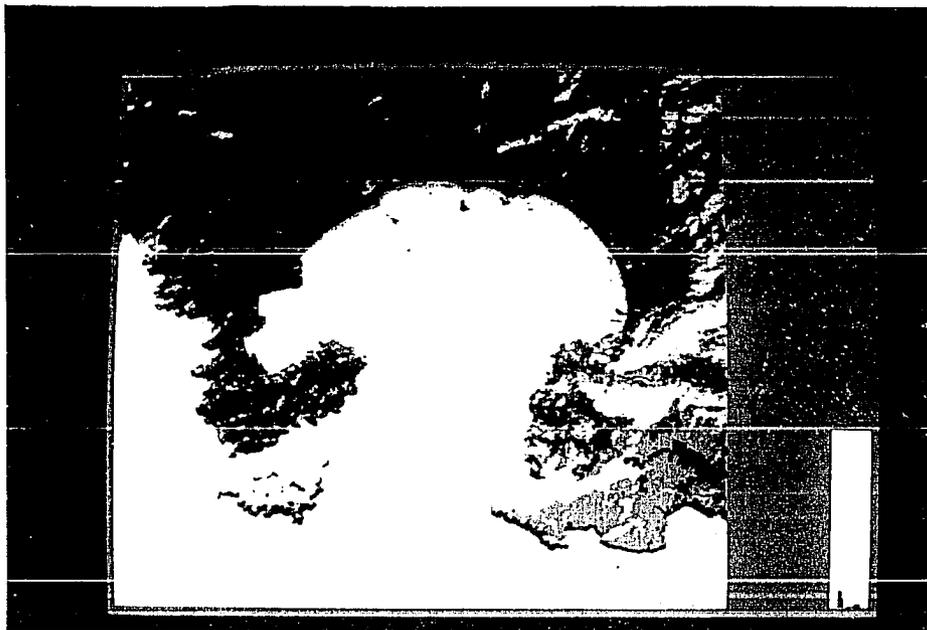


Imagen 3
Falso color con histograma ecualizado exponencial negativo

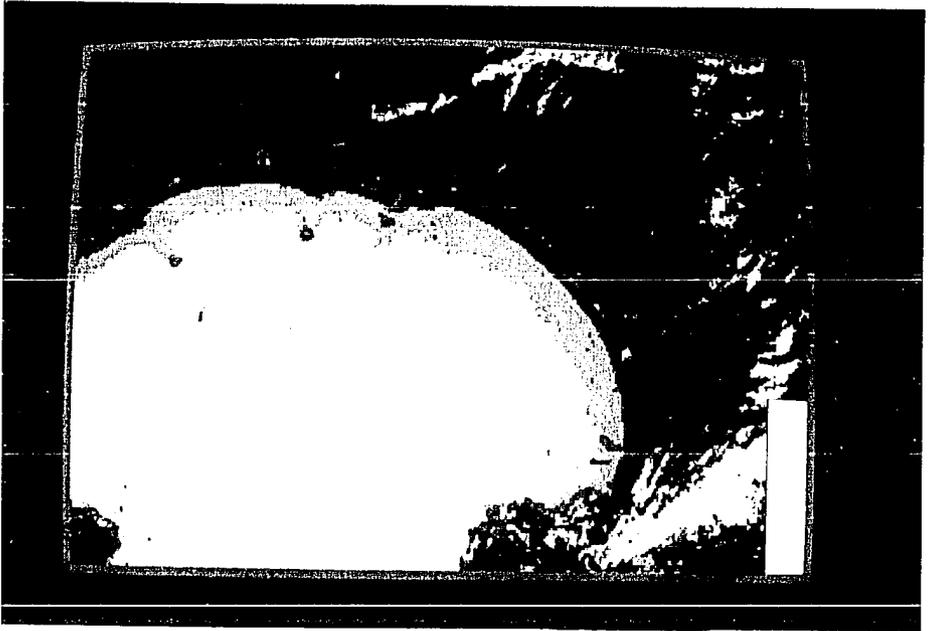


Imagen 4
Acercamiento de la imagen anterior

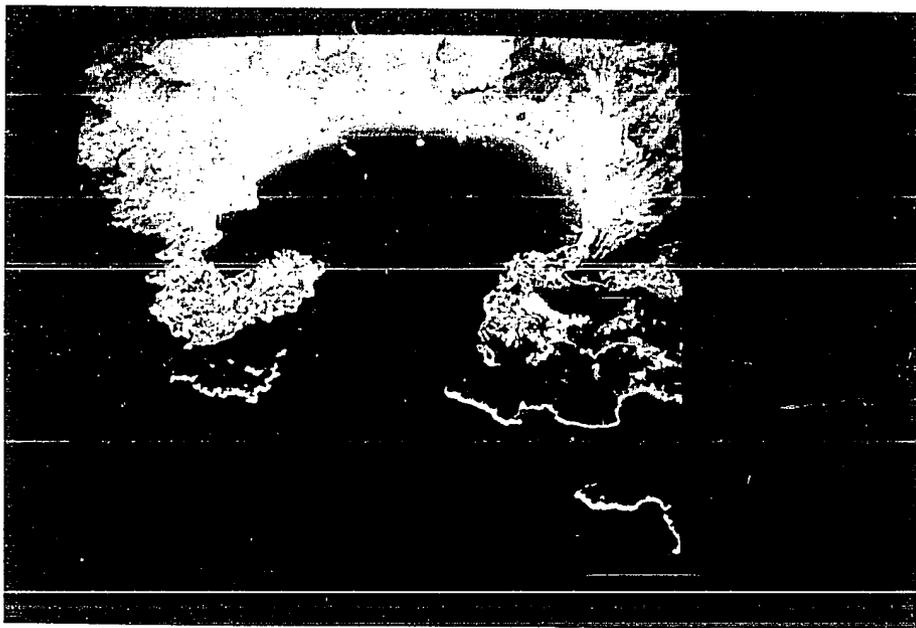


Imagen 5
Banda 1 ecualizada exponencial positiva en grises

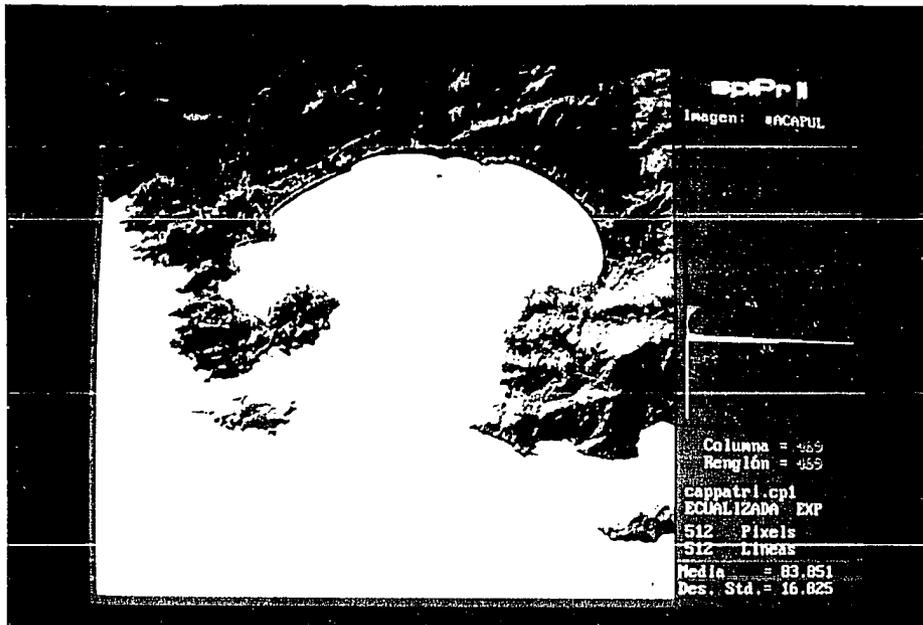


Imagen 6
Banda 1 filtrada con Fourier en grises.
Ecualización del histograma exponencial negativa

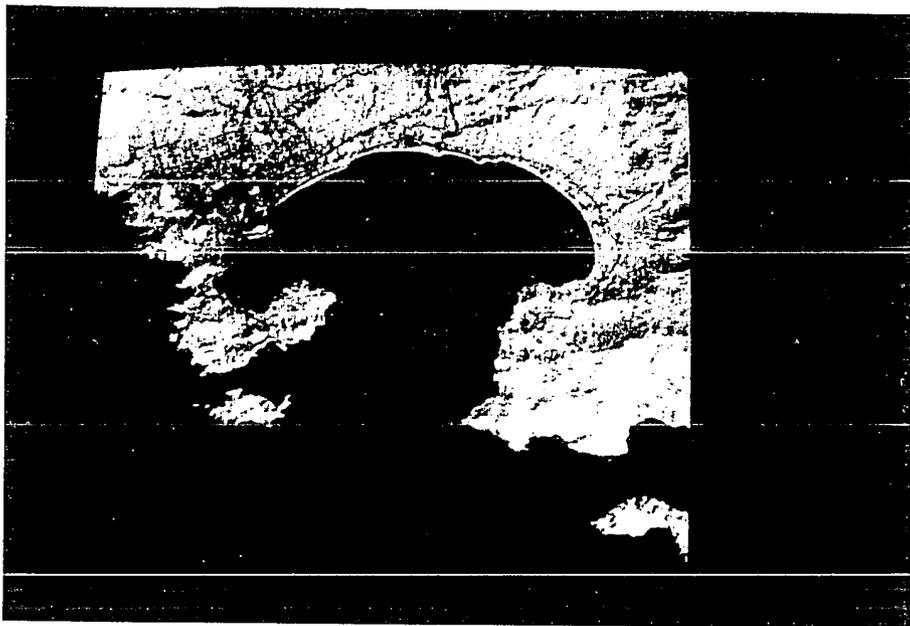


Imagen 7
Banda 3 ecualizada lineal positiva en grises

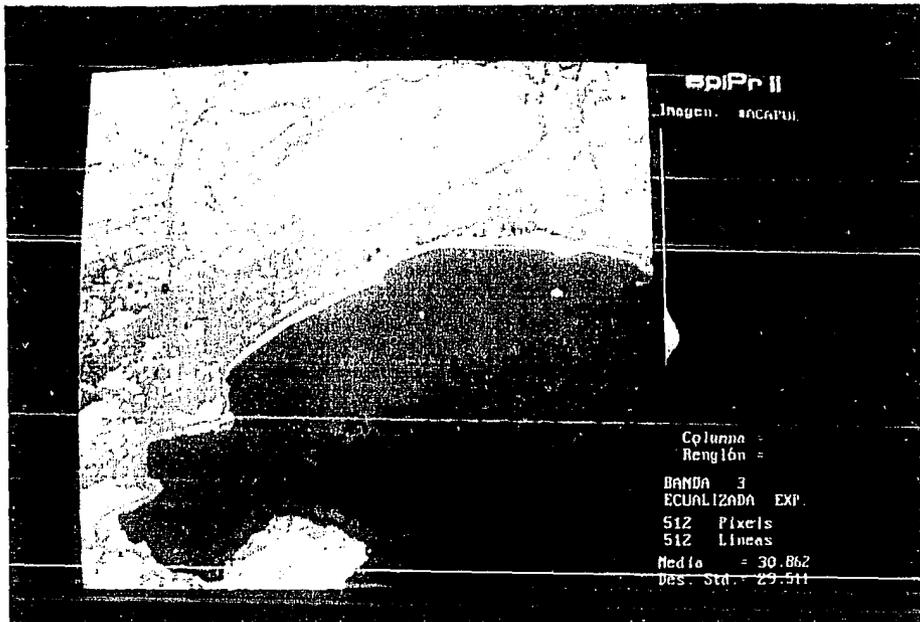


Imagen 8
Banda 3 con ecualización lineal positiva en grises. Zoom.

5. REALIDADES Y PERSPECTIVAS

5.1

INTRODUCCION

En este capítulo se tratan ciertos puntos de interés para aquellos que apoyan decisiones de planeación en técnicas de percepción remota y procesamiento de imágenes digitales. Así mismo, se comentan cuestiones concretas dentro del campo computacional, mencionando algunos paquetes comerciales y no comerciales, desarrollados en distintas plataformas de hardware, con lo que se pretende que el lector adquiera una idea firme y clara de las ventajas y limitaciones del uso de la percepción remota en la planeación, empleando para ello criterios tales como variedad de software especializado, disponibilidad, costo y requerimientos de equipo de cómputo y procesamiento. Con todos estos parámetros, el siguiente paso es enfrentar adversidades contra las alentadoras expectativas que ofrecen las técnicas y herramientas actuales al planeador. Para esto último se mencionan algunas de las investigaciones que actualmente están utilizando percepción remota tanto dentro de la Universidad Nacional, como fuera de ella.

5.2

PERCEPCION REMOTA

Dentro de lo que es percepción remota, no existen sistemas de cómputo propiamente dichos que realicen directamente tal técnica, por lo que los parámetros a tomar en cuenta se basan principalmente en la adquisición de las imágenes y/o fotografías que se utilizarán para su posterior procesamiento.

La materia prima para una aplicación de percepción remota es, definitivamente, las imágenes. Dichas imágenes pueden provenir de tres fuentes principales: plataformas satelitales, vuelos de fotogrametría y, algo que últimamente ha tomado mucho auge y que no se menciona en la bibliografía referente al tema, las videograbaciones. Existe un cuarto tipo de fuente que consiste en dispositivos colocados sobre la tierra a ciertas alturas y captan

imágenes del terreno, sin embargo, este trabajo está enfocado básicamente a la aplicación de los dos primeros tipos, con lo que aquí simplemente se menciona la existencia de tales dispositivos.

5.2.1

IMAGENES TOMADAS POR SATELITES

Como se ha podido ver en el segundo capítulo de este trabajo, los satélites son fuente importante, utilizada en los últimos años, para obtener información visual del planeta en el que vivimos. Existen misiones espaciales exclusivamente diseñadas para la exploración de la Tierra por medio de imágenes, más que por datos tabulares. Ahondar más en este aspecto sería redundar la información presentada en aquel capítulo. Lo que es preciso tocar en este punto, es la accesibilidad real, tanto física como económica, de las imágenes de nuestro país que son obtenidas por satélites extranjeros. La información que se presenta a continuación fue tomada en su mayoría de folletos publicitarios de EOSAT y SPOT Image, así como mediante pláticas con los representantes en México de cada una de las dos compañías.

Los Estados Unidos han comercializado las imágenes obtenidas por sus satélites Landsat, y el lanzamiento de los SPOT franceses los ha obligado a disminuir sus precios de venta. Desgraciadamente, la baja resolución espacial de las imágenes Landsat ha hecho que sean descartadas para cualquier análisis de problemas urbanos; sin embargo, siguen siendo magníficas para cuestiones de clasificación en zonas de superficie amplia. El conseguir una imagen Landsat actualmente en nuestro país no es muy difícil. Existe la empresa *NIVELES*, ubicada en la ciudad de Aguascalientes, quienes son distribuidores de tales imágenes. Las imágenes Landsat MSS y TM se venden en formatos de cinta magnética, papel fotográfico y papel bond. El área que puede abarcar una imagen de este satélite es de 100×100 kms, es decir, $10,000 \text{ km}^2$, o bien, a escala de video computacional, 30 mts. por pixel. El costo de una imagen de este tipo es de unos \$4,000 USD en promedio, por todas las bandas de una MSS, en tanto que el tiempo de entrega va desde tres semanas hasta tres meses, si es que se requiere programar al satélite para una cierta área. La empresa que controla los destinos de los satélites Landsat es la estadounidense *EOSAT* (del inglés: *Earth Observation SATEllites*), cuya sede se encuentra en el estado de Maryland, U.S.A. EOSAT garantiza sus imágenes con un máximo de 25% de nubosidad dentro de esos $10,000 \text{ km}^2$. Actualmente, el Instituto Mexicano de Comunicaciones ha tenido la idea de colocar en la Ciudad de México una antena receptora de imágenes Landsat de manera que se evite el intermediarismo y así el costo de dichas imágenes sea más accesible para los usuarios.

En lo que respecta a SPOT, la compañía francesa encargada de la comercialización y distribución de las imágenes, SPOT Image con sede en la ciudad de Toulouse, Francia, tiene como representante en México a la empresa *COSMOCOLOR*, que opera en la colonia Educación de la Ciudad de México. Esta empresa se encarga de recibir los pedidos de imágenes SPOT que se deseen dentro de dos modos espectrales, el modo multiespectral y el modo pancromático, dentro de tres presentaciones distintas, en papel fotográfico, en cintas magnéticas y en CD-ROM (discos compactos grabados con láser) para poder efectuar un

proceso posterior de la imagen. El problema con la adquisición de las imágenes en cintas magnéticas es que es necesario tener acceso a un proceso de *bajado* de la información a un diskette para que posteriormente se pueda procesar en un equipo PC o estación de trabajo. El Centro Científico IBM ofrece el servicio de transferencia de cinta a diskette. Es posible también elegir la resolución o escala de fotografías, por ejemplo, imágenes en escala 1:400000, 1:200000, 1:100000, 1:50000 están disponibles comercialmente, mientras que la escala 1:25000 solamente sobre pedido. Existen otros servicios adicionales por parte de SPOT como lo es la toma de imágenes con estereoscopia, superposición de efectos espectrales por parte del mismo satélite, etc.

Una vez que Cosmocolor toma el pedido de la imagen que se quiere, así como del tamaño, tipo y escala, se revisan los catálogos de imágenes existentes para saber si se cuenta con lo deseado, ya que de lo contrario se transfiere la orden a SPOT Image con el fin de programar al satélite para que, en la próxima pasada por el punto de interés, adquiera la imagen solicitada. El tiempo de espera puede variar desde tres semanas hasta tres meses, dependiendo en primer lugar de si la imagen que se quiere es del año actual, o bien puede ser de años anteriores, con lo que se revisa su existencia en catálogo, ya que, de requerirse una imagen del presente año, hay que ordenar el pedido. Así mismo se está en función del estado meteorológico de la zona, ya que SPOT Image garantiza imágenes con un máximo de 10% de nubosidad.

Actualmente (finales de 1993) el costo de una imagen multispectral SPOT con preprocesos mínimos de corrección geométrica y con una resolución de 20 mts. por pixel (escala 1:200000) asciende a 12,300 francos franceses (unos 6,600 nuevos pesos), o bien, 15,900 francos franceses una imagen pancromática de las mismas características (unos 7,900 nuevos pesos).

Si lo que se necesita son imágenes de áreas considerablemente grandes, como pudiera ser un aspecto global del Golfo de México, o toda la franja fronteriza al norte del país, lo ideal es conseguir una imagen de algún satélite geoestacionario, como lo son el NOAA, el GOES, el TIROS o algún otro. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que depende de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, cuenta con equipos de alta capacidad de procesamiento de imágenes en sus instalaciones de Tacubaya, D.F., en donde se recogen imágenes para predicción del tiempo cada media hora de todos estos satélites, incluyendo al MORELOS mexicano. Es posible realizar algún convenio con el SMN para la adquisición de este tipo de imágenes.

El Instituto de Geografía de la UNAM cuenta con antenas receptoras de imágenes de satélites geoestacionarios para su procesamiento y análisis como apoyo a estudios meteorológicos. Otras instituciones de nuestra Universidad están provistas de equipos semejantes, como son el Instituto de Astronomía (tanto en sus instalaciones de la Ciudad Universitaria, como en el observatorio astronómico de Tulancingo, Hgo.), el Centro de Ciencias de la Atmósfera y el Instituto de Geofísica.

5.2.2

FOTOGRAMETRIA

Cuando los estudios que se van a realizar requieren de imágenes muy detalladas, de zonas muy específicas, de aspectos muy puntuales, las plataformas satelitales no ofrecen la calidad de imagen suficiente para cubrir tales necesidades. Es entonces que se piensa en contratar los servicios de empresas que efectúen vuelos de reconocimiento fotogramétrico, esto es, que ofrezcan servicios de fotografía aérea. En México existen varias empresas que se dedican a ofrecer tales servicios. Una de las más importantes es la que posee la transnacional Ingenieros Civiles Asociados, ICA, llamada Aerofoto, S.A. que por la suma de 25,500 nuevos pesos ofrece un negativo de una fotografía del área de interés que se desee a escalas inferiores a 1:20000.

5.2.3

VIDEOGRAMETRIA

Ante los escasos recursos económicos con que se cuenta actualmente, los investigadores en esta área se han visto obligados a utilizar al máximo su ingenio para poder suplir la carestía de imágenes y así evitar la piratería entre los grupos que trabajan en el medio, actividad que generalmente provee imágenes fuera del rango de tiempo en que se necesitan, es decir, se trabaja con imágenes bastante viejas conforme a los objetivos del estudio.

Se han logrado desarrollar técnicas altamente eficientes como la utilizada en el Instituto de Geografía, en donde se realizó un proyecto de análisis de erosión por medio de una cámara de video de 8 mm. Sony introducida en un globo inflado con gas helio y sujeto a un cordón. Esta cámara realizó un vuelo evidentemente no tripulado y efectuó tomas durante unos 40 minutos de la zona de interés, a una altura de 150 metros aproximadamente. El trabajo de gabinete consistió en el congelamiento de los mejores cuadros por medio de una tarjeta multimedia conectada en una computadora PC, y su almacenamiento en archivos de disco duro para su posterior procesamiento con el software adecuado. El resultado: 86,400 imágenes a 24 por segundo en una cinta de 60 minutos de duración, con un costo inferior al 10% del valor de una sola imagen SPOT (suponiendo que ya se cuenta con la cámara, cuyo valor comercial es de unos 2,500 a 3,000 nuevos pesos, así como con la tarjeta multimedia de \$1,000 USD y la videoreproductora *hi-fi* de unos 2,000 nuevos pesos, equipo que requiere de inversión únicamente al inicio, ya que se utiliza en un sinnúmero de experimentos), y con mayor resolución, debido a la poca altura a que se toma la película (Fuente: revista de Ciencia y Tecnología, editada por CONACYT, Junio de 1993).

Esta técnica ha sido también adoptada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual ha alquilado inclusive un helicóptero para poder realizar los vuelos bajos de reconocimiento, y en los que se efectúan las tomas de video (Peralta, *et al.*, 1993).

5.3 PROCESAMIENTO DE IMAGENES DIGITALES

Existe una amplia variedad de software especializado en el proceso de imágenes digitales de percepción remota, desarrollado en diferentes lugares y para una gran diversidad de equipos. Se mencionarán los más conocidos en el ámbito nacional de la percepción remota.

En primer término se tienen los sistemas extranjeros. El ITC de Holanda ha desarrollado *ILWIS* (del inglés: *Integrated Land and Water Information System*) que es uno de los primeros procesadores de imágenes de la era actual, y comercializado en México. Su primera versión (1987) tenía la dificultad de trabajar exclusivamente con una tarjeta de video MATROX, altamente utilizada en Europa pero muy poco conocida en nuestro país y de precio relativamente excesivo (alrededor de los \$2,500 USD). Posteriores versiones de *ILWIS* flexibilizaron su utilización hacia tarjetas de video *VGA* (del inglés: *Video Graphics Adapter*), lo cual propició una fuerte distribución del software dentro del ambiente de la percepción remota. Actualmente, la versión 3.1 de *ILWIS* se consigue en un lapso de dos a tres meses a un precio de 7,000 florines holandeses (unos \$3,300 USD). Su uso requiere de un equipo PC/AT con un procesador mínimo 80286 a 16 Mhz., 2 Mb de memoria RAM, 5 Mb mínimo en disco duro, una tarjeta de video *VGA* con un monitor de resolución media, y una tarjeta de video *TTL* (del inglés: *Transistor-Transistor Logic*) con un monitor Multisync a color de alta resolución. Actualmente, el ITC está trabajando en una versión para estaciones de trabajo *APOLLO* que será liberada a principios de 1994, como un primer paso hacia la expansión y aprovechamiento de las capacidades del ambiente *UNIX*.

ERDAS es el nombre del sistema de procesamiento de imágenes desarrollado en los Estados Unidos por *ERDAS, Inc.* con sede en la ciudad de Atlanta, en versiones tanto para PC como para estaciones de trabajo, dentro de las cuales se encuentran desarrollados sistemas para plataformas *SUN*, *Hewlett-Packard*, *IBM*, *DECstations* de *Digital*, *Data General*, así como para la *IRIS* de *Silicon Graphics*. Este paquete tiene la ventaja de ser cien por ciento compatible con la base de datos geográfica *ARC/INFO*, cuyas características se verán posteriormente. Ambos sistemas están representados en México por la misma compañía (*Sistemas de Información Geográfica, S.A., SIGSA*). Además de su compatibilidad con *ARC/INFO*, *ERDAS* es compatible al 100% con formatos de *AutoCAD*, *GRASS* y otros formatos de imágenes como *TIFF*, *DLG*, *DFAD*, *SIF*, etc.

En lo referente a la plataforma *IRIS*, es prudente mencionar que su modelo *INDIGO* cuenta con un procesador de imágenes dentro de las utilerías de su sistema operativo *IRIX*, llamado *EXPLORER*. Dicho procesador constituye una de las herramientas más poderosas del equipo, ya que este es internacionalmente conocido por su alta capacidad de despliegue de gráficos, una de las características que lo hacen superior a otros equipos de su misma clase. La Dirección General de Servicios de Cómputo Académico (*DGSCA*) de la *UNAM*, cuenta con un laboratorio de visualización gráfica en donde existen únicamente equipos *Silicon Graphics*. El Departamento de Sistemas de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, dentro de la sección de Planeación, es poseedor de un equipo de esta magnitud, utilizado precisamente para el desarrollo de su línea de investigación en percepción remota. Cabe mencionar que *DGSCA* posee en la supercomputadora *CRAY*, un

paquete de procesamiento de imágenes llamado KHOROS, cuyo manejo es muy parecido al Explorer de Silicon Graphics, pero cuyas capacidades son muy superiores comenzando por el tipo de hardware sobre el que está desarrollado.

Australia no se queda atrás en el desarrollo de procesadores de imágenes y así ha lanzado al mercado internacional el *ER-Mapper* (del inglés: *Earth Resources - Mapper*, Mapeador de Recursos de la Tierra) para plataformas SUN. Este constituye un excelente procesador de imágenes por su facilidad de manejo y la gran diversidad de funciones que posee, además de su precio accesible, considerando que por solamente \$200 USD se puede obtener una licencia de uso de la versión 3.0, con la restricción de que se utilice exclusivamente para fines didácticos y no de investigación dentro de la UNAM.

El mismo paquete AUTOCAD se ha utilizado como procesador de imágenes, pero en un sentido muy limitado; es decir, debido a que este paquete fue creado originalmente para diseñar, sus capacidades de proceso de imágenes no son muy amplias, lo que lo pone en desventaja con los diversos paquetes diseñados de origen para ese objetivo. Aún así, AUTOCAD pone de manifiesta su preocupación por abarcar y aprovechar las ventajas gráficas de los equipos de cómputo en la creación de rutinas de mapeo y conexión con imágenes en formato vectorial. Es posible ligar estas rutinas con alguna base de datos geográfica, como se verá más adelante.

Pasando ahora a los sistemas desarrollados en México, uno de los más conocidos es el SPIPR-II, Sistema Personal Interactivo en Percepción Remota versión 2, desarrollado en plataforma PC/AT por el Centro Científico de IBM, ubicado en la colonia San Jerónimo del D.F. La idea nació a petición del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI, que contrató a dicha empresa para el desarrollo de un sistema que pudiese ser capaz de analizar las imágenes SPOT que estaban siendo adquiridas por el Instituto, al través de un convenio con ORSTOM, una institución francesa dedicada a realizar investigaciones en el área de percepción remota, y que participó con INEGI en la producción de varias de sus cartas de la República Mexicana. La primera versión del SPIPR fue repartida a varios centros de investigación, tanto de la UNAM como de otras instituciones, con el fin de que los usuarios opinaran acerca del sistema y existiera la tan deseada retroalimentación que hiciera al SPIPR cada vez mejor. Desgraciadamente, a la salida de la segunda revisión del sistema, también salió del Centro Científico el líder del proyecto, con lo que la idea del perfeccionamiento fue retrasada. Sin embargo, IBM no quitó el dedo del renglón y el SPIPR apareció en su segunda versión siendo mucho más amigable, fácil de usar y poderoso que antes.

Ante la rigidez de ILWIS en cuanto al manejo de tarjetas de video MATROX, y la poca accesibilidad tanto técnica como económica a ese tipo de tecnología gráfica en México, dentro del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y Sistemas, IIMAS, de la UNAM, Alfredo Cortés, un alumno egresado de la Facultad de Ciencias e inscrito en la Maestría en Computación, desarrolló como tema de tesis de posgrado, un Sistema de Procesamiento de Imágenes Digitales llamado precisamente SPID (por las siglas), para equipos PC con un mínimo de 256 Kb de memoria RAM, cualquier tipo de procesador

central, de preferencia coprocesador matemático, un mínimo de 1 Mb en disco duro mas lo requerido por las imágenes, y cualquier tarjeta de video (CGA, EGA, VGA en sus distintas resoluciones, e inclusive, MATROX). Este sistema hecho en lenguaje C y cuya primera versión estuvo lista a finales de 1990, se ha venido modificando por su autor, quien se encuentra trabajando actualmente para el Instituto de Geografía, hasta llegar a lo que ahora se conoce como el sistema *PIXSAT* (híbrido de las palabras *PIXel* y *SATélite*), y que se comercializa dentro de la misma UNAM a un costo de \$1,000 USD. Es un excelente sistema con capacidades de procesamiento fuera de lo común, como lo son transformaciones de Fourier, transformaciones de componentes principales de Hotelling, una serie de 10 tipos de filtrados de imágenes (incluyendo filtros definidos por el usuario), emulador de tarjetas de video con distintos colores, manejo de operaciones con imágenes, tanto aritméticas como lógicas, manejo de histogramas, composición en falso color, creación de LUT's por el usuario, clasificación supervisada y no supervisada, cálculo de índices de vegetación y otros atributos menos conocidos, pero no por ello menos importantes. Su uso se extiende por varios lugares dentro de la UNAM, y se pretende que no solamente sea la UNAM el usuario principal del sistema. En la actualidad, Alfredo está desarrollando una versión del *PIXSAT* para plataformas SUN.

El Instituto de Geofísica de la UNAM ha querido estar a la vanguardia en lo que se refiere a desarrollo de sistemas de procesamiento de imágenes y, por conducto del Dr. Jorge Lira y su equipo de trabajo, realizaron el *SANDI* (siglas de *Sistema Analizador Digital de Imágenes*), cuyas características son similares a las del *PIXSAT*, y el cual está disponible para su prueba dentro de las instalaciones universitarias.

En el Departamento de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) un equipo de trabajo comandado por Manuel Domitzu Kono, ha desarrollado un sistema llamado *PPI* (*Programa de Procesamiento de Imágenes*), con las siguientes características: permite desplegar una o varias imágenes de satélites meteorológicos, simultáneamente o en forma secuencial; también permite extraer información de una imagen como el valor de un pixel o de varios pixels, así como su media, varianza e histograma de frecuencias. Este programa permite, además, procesar una imagen para desplegar en forma magnificada una parte de ella, filtrarla, colorearla y/o superimponerle mapas o dibujos. Los objetivos planteados al diseñar este programa fueron (Domitzu, 1991 y 1992):

- a) que corriera en un equipo de bajo costo y fácil mantenimiento,
- b) que fuera fácilmente modificable y extensible de acuerdo a los diversos requerimientos,
- c) que fuera de fácil uso.

5.4 SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

Los GIS han tenido un desarrollo casi paralelo a los procesadores de imágenes. Existen comercializados distintos GIS para diferentes plataformas de hardware y con diversos costos, casi todos desarrollados en los Estados Unidos, o cuando menos son los que se ofrecen y venden en México. En nuestro país poco se ha hecho para el desarrollo de estos sistemas. Más bien, los esfuerzos se enfocan al proceso de imágenes y no a las bases de datos georreferenciadas.

Existen varios paquetes geográficos en el mercado actualmente. En un artículo aparecido en la revista de la Asociación Americana de Planeación (*APA*, del inglés: *American Planning Association*) se realizó un estudio muy completo comparando cuatro de los principales GIS's existentes en el mercado en aquel tiempo: Atlas Graphics, LandTrak, MapInfo y Arc/Info. Los cuatro paquetes tienen características en común. Todos están basados en vectores, es decir, que los rasgos de mapeo que tienen, como las líneas y los polígonos, se crean uniendo puntos que representan ubicaciones individuales. Todos están diseñados para ambientes MS-DOS de computadoras personales compatibles, y todos están bien documentados. Se escogieron estos cuatro paquetes por varias razones: (1) tienen una presencia significativa en el mercado; (2) representan diferentes y útiles elementos de mapeo computarizado y análisis geográfico; y (3) pueden usarse en una amplia variedad de aplicaciones de planeación. Puede decirse que no hay conclusión alguna acerca de cuál de los cuatro es el mejor; simplemente se organizó, con base en estas comparaciones, una guía general de lo que se debe considerar al momento de adquirir un paquete de este tipo (Levine and Landis, 1989).

Dentro de lo que es la aparición de los GIS en nuestro país, existe la siguiente información: SIGSA, ya antes mencionada y ubicada en la colonia del Valle, D.F., distribuye ARC/INFO, un GIS muy completo que se presenta para plataformas PC, SUN y Silicon Graphics, aunque a precios muy diferentes que van desde \$10,700 USD el paquete completo para PC, hasta \$28,500 USD la versión para estaciones de trabajo. ARC/INFO está desarrollado por la compañía estadounidense *Environmental Systems Research Institute, Inc.* ubicada en la ciudad de Nueva York. Es un software diseñado para ser abierto y que permita una constante evolución. Se basa en tecnología previamente probada permitiendo la incorporación de nuevas tecnologías conforme se van desarrollando. ARC/INFO está basado en un modelo de datos georelacional que reúne información geográfica en una serie de "capas" independientes. Esta conceptualización de agrupación de datos hace que ARC/INFO sea compatible con numerosos sistemas de manejo de bases de datos, lo cual crea una poderosa herramienta al poder utilizar otro tipo de software para complementar la información capturada en el GIS. El integrador de imágenes de ARC/INFO permite al usuario desplegar imágenes raster, soportando formatos como GRID, RLC, BIL, TIFF, BIP, etc. (Fuente: folletos publicitarios de ARC/INFO).

La empresa SECO Computación, en la colonia Nápoles, D.F., es representante de MAP/INFO, un GIS desarrollado por *MAPINFO Corporation* con oficinas centrales en Troy, New York, y cuyas ventajas son, principalmente, su facilidad de uso por medio de menús, se encuentra muy bien documentado y su bajo costo (únicamente \$750 USD en su

versión para PC, no se han desarrollado versiones para estaciones de trabajo); en contraparte, sus desventajas son su limitada capacidad de selección de datos y un pobre nivel de comparación de direcciones simplificadas. Actualmente, un equipo de trabajo de la Fundación Arturo Roseblueth en esta capital, ha desarrollado una interfaz para que MAP/INFO, en su condición de GIS, sea compatible con AUTOCAD, en su condición de procesador de imágenes, para que de esa manera, la información almacenada en la base de datos, pueda referenciarse a una imagen satélite, o bien, una fotografía aérea digitizada y procesada en ambiente AUTOCAD.

El mismo sistema ILWIS tiene las capacidades de una base de datos geográfica, lo cual hace de éste uno de los favoritos de los analizadores de imágenes, y a precio algo más accesible que la interfaz ARC-INFO/ERDAS.

SELPER-México anuncia la aparición para 1993 del SIGEF, un sistema de información geográfica y estadística que cubre la región fronteriza entre México y los Estados Unidos. Desarrollado entre el Colegio de la Frontera Norte (COLEF), el ORSTOM francés y con una participación financiera de CONACYT, tendrá capas de información concernientes al medio físico como la topografía, la climatología, la hidrología, la geología, los usos de suelo, etc., así como información estadística de la economía de la región. Analizará imágenes Landsat TM 1991 y SPOT 1992 de zonas irrigadas (Imperial Valley y Mexicali) y urbanas (Tijuana y San Diego). El acceso a esta información se realizará por vía informática (SELPER-México, 1993).

Jorge Roji y su equipo de colaboradores han liberado ya algunas versiones de la conocida *Guía Roji* para computador. Esta es una base de datos geográfica hecha para y por mexicanos. Cuenta con prácticamente todas las funciones de un GIS común y corriente con la novedad de que tiene todos los nombres de las calles, de las colonias, los códigos postales, algunos sentidos de circulación de avenidas, estaciones de Metro, etc. Por NS\$,000 uno puede tener a la Ciudad de México al alcance de su PC.

5.5

ESTADO ACTUAL DE LA PERCEPCION REMOTA EN MEXICO

Ya son pocas las instituciones que no están interesadas, o que no saben que existe esta técnica. Ignorar su existencia es cerrar las puertas a tecnologías de punta. Cada vez es mayor la difusión que se le otorga por distintos medios, y cada vez es mayor el número de aplicaciones de esta herramienta. Solamente es cuestión de dar un vistazo rápido a lo que se realiza en nuestro país con la percepción remota para darse cuenta del auge tan amplio que está teniendo.

Comenzando por casa, la UNAM tiene involucrados a más de cinco instituciones en esta área. El Instituto de Geografía realiza actualmente un inventario de recursos forestales con imágenes satélite. El Instituto de Ingeniería ha incluido a esta técnica en más de un proyecto;

como ejemplo se puede citar a "Transporte y Estructuras Metropolitanas", el cual, conjuntamente con la División de Estudios de Posgrado de Ingeniería, efectuó el análisis de varias imágenes SPOT del Valle de Chalco para ayudar a establecer la relación existente entre la expansión del transporte público y el cambio en el uso del suelo de esa zona (Cortés, 1993 y Santos, 1993). Dentro del área de Ingeniería Ambiental del mismo instituto se realizan estudios para el establecimiento de áreas idóneas para el almacenamiento de desechos radiactivos por medio de imágenes satélite.

El Instituto de Geofísica realiza prospección geológica y estudios de propiedades geofísicas del suelo con imágenes Landsat. Por su parte, el Instituto de Astronomía procesa imágenes de otros planetas y sus satélites naturales tomadas por naves no tripuladas como las misiones Voyager 1 y 2.

El Instituto de Limnología y Ciencias del Mar estudia la cartografía costera nacional con imágenes satélite. Recientemente, este instituto ha promovido la integración de la percepción remota en lo que será la propuesta de proyecto SEA-MEX para la Global Environmental Facility creada por el Banco Mundial para el cuidado y la sanidad del océano mundial. Este proyecto está siendo organizado por el Instituto Nacional de Ecología y en él participan instituciones de investigación y normatividad de toda la República relacionadas directa e indirectamente con el cuidado de la zona costera y la zona económica de los mares mexicanos. Dicha propuesta deberá entregarse en este año.

El Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y Sistemas apoya el desarrollo de nuevas técnicas de cómputo para aplicarlas al procesamiento computarizado de imágenes de percepción remota.

La División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería ha abierto líneas de investigación en esa área y su aplicación a los procesos de planeación (nada menos el presente trabajo) en diversos aspectos como son, planeación urbana, planeación regional, planeación agrícola, planeación industrial, planeación portuaria, planeación del transporte, planeación turística, planeación de recursos, etc., etc. En Junio de 1992 el comité de evaluación del Programa de Apoyo a Divisiones de Estudios de Posgrado, PADEP, aprobó un proyecto a la DEPEFI sobre la aplicación de la percepción remota en el desarrollo del transporte, particularmente el marítimo, realizado por la sección de Planeación del Departamento de Sistemas, la cual se encuentra fuertemente relacionada con instituciones del sector público interesadas en la ejecución de proyectos que involucren estudios de percepción remota. Así mismo, este año se han presentado otras propuestas de proyectos por parte de la misma División en los que se involucra la percepción remota, pero ahora en estudios relacionados con ecología, particularmente, un proyecto de determinación de fuentes fijas de emisión de contaminantes atmosféricos analizando imágenes satélite.

Fuera de casa, PEMEX cuenta con un departamento de percepción remota para la identificación de posibles yacimientos petrolíferos en zonas con alta acumulación de carbón.

La Comisión Federal de Electricidad, dentro de la Subdirección de Ingeniería Civil, utiliza la percepción remota para prospección geológica como apoyo a la decisión de ubicación de presas.

La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos hace estudios con percepción remota para análisis del potencial agrícola de los suelos.

La Secretaría de Desarrollo Social (antes SEDUE) ha contratado asesores extranjeros para la realización de estudios viales en el desarrollo urbano de las principales ciudades de la República. El Instituto Nacional de Ecología, también dependiente de SEDESOL, busca la percepción remota y su aplicación en la preservación y mejoramiento del medio ambiente.

Todos los comentarios anteriores se basan en pláticas con personas involucradas dentro de cada una de las instituciones mencionadas. No existen, a la fecha, reportes que avalen las investigaciones realizadas por ellos, por lo cual no es posible establecer referencias bibliográficas al respecto.

El Instituto Mexicano del Transporte cuenta con equipo de cómputo y software suficiente para realizar estudios de transporte con imágenes satélite. La Dirección General de Carreteras Federales, también de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes no pudo realizar estudios de alternativas de trazos de caminos y carreteras con imágenes satélite debido a la baja resolución de las mismas y al alto costo que implicaría el esperar su adquisición, aunado esto al costo de la imagen en sí, sin embargo, utiliza frecuentemente el análisis de fotografías aéreas para la identificación de trazos idóneos (recordar que la fotogrametría es parte también de la percepción remota).

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, con sede en la ciudad de Cuernavaca, Mor., guarda un registro de imágenes Landsat de toda la República Mexicana desde el año de 1977. El Servicio Meteorológico Nacional, como ya se mencionó, utiliza la percepción remota para estudios meteorológicos y de predicción de climas.

En la iniciativa privada, no es tan extensivo el uso de la percepción remota debido al alto costo que supone la adquisición de equipo, software e imágenes para hacer un estudio. No obstante, empresas como Grupo Peñoles y otras del mismo ramo minero, utilizan esta técnica dentro de sus departamentos de exploración de yacimientos minerales.

5.6

SELPER

América Latina está altamente interesada en los estudios que se pueden hacer con percepción remota. Unos de los países más avanzados en este sentido es Brasil, al través de su Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE), el cual está reconocido mundialmente como uno de los mejores institutos de investigación que existen actualmente en esa área.

Es precisamente en América del Sur en donde nació la idea de fundar una asociación que reuniera a los mejores exponentes de la percepción remota de Latinoamérica. De ahí el origen de SELPER, Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota, la cual está formada por una organización bien fundamentada, dentro de la que existen varios "capítulos" o zonas geográficas, una de las cuales es la de México, presidida por el Dr. Román Álvarez, ex-director del IIMAS y actualmente director del Instituto de Geografía. El Capítulo México de SELPER asocia a más de 60 personas en toda la República, quienes su objetivo común es el desarrollo y el conocimiento cada vez más profundo de las técnicas de percepción remota y sus aplicaciones.

Dentro de las actividades periódicas de SELPER está el organizar reuniones anuales en algún lugar de la República, cuando son nacionales, así como en algún lugar de América Latina cuando son internacionales. En estas reuniones se exponen los avances más recientes en investigaciones utilizando percepción remota y se presentan servicios tales como software, equipo de cómputo, publicaciones, etc. Pero lo más importante es el intercambio de conocimientos y experiencias que se tienen en muy diversos temas de investigación, ya que el contacto es con personas de toda América Latina. Así también, se exponen los máximos avances en tecnología satelital, se informan las actividades de empresas del primer mundo alrededor de todo lo relacionado con percepción remota y, en ocasiones, se imparten cursos interesantes para toda la comunidad.

SELPER México emite un boletín bimestral en el que aparecen las últimas noticias acerca de las actividades de los diferentes capítulos de la sociedad. También se informa de futuras reuniones y se publican artículos proporcionados por miembros de la sociedad que deseen exponer sus investigaciones a la luz pública.

5.7

PERSPECTIVAS DE LA PERCEPCION REMOTA EN LA PLANEACION

¿Cómo incorporar una tecnología tan dura en un proceso suave como lo es la Planeación? ¿Cómo lograr que técnicas temporalmente estáticas puedan ser de utilidad en procesos tan dinámicos como los que suponen los estudios de Planeación? Estas son algunas de las preguntas que han flotado a lo largo de casi todo el tiempo de realización de este trabajo. Sin embargo, las cosas caen por su propio peso. La metodología de la Planeación no es modificable en lo absoluto por una técnica tan sofisticada como puede ser la percepción remota. La verdadera utilidad reside en la manera de obtener la información que se requiere para la aplicación de la metodología y el posterior análisis de decisiones.

Muchas veces, el tomador de decisiones no cuenta, por falta de tiempo, con los elementos que le permitan actuar acertadamente en una situación de alternativas. El recopilar información de campo es un proceso que, por lo general, gasta demasiados recursos temporales, humanos y por qué no, materiales. El hecho de que una imagen diga más que mil palabras es sumamente útil para que, de un sólo golpe y después de un corto período de análisis, pueda llegarse a un nivel de información quizás no tan detallado como al que se puede llegar después de un estudio de campo, pero sí con la aproximación suficiente para tener una idea adecuada de los valores de los parámetros a tomar en cuenta en la elección de la alternativa a seguir. Es muy importante aprovechar la gran cantidad de información que guarda una imagen sabiéndola interpretar.

Los procesos de planeación en general, deben ser necesariamente más eficientes día con día, para lo cual se requiere incorporar a su metodología elementos de alto nivel tecnológico, que hagan de la recopilación de información y su procesamiento una tarea que consuma el menor tiempo posible, con el propósito de obtener resultados prácticamente inmediatos, con los cuales apoyar al tomador de decisiones en el análisis de alternativas de solución tanto a corto, como a mediano y largo plazos.

5.7.1

PERSPECTIVAS PARA EL PLANEADOR: PLANTEAMIENTO DE POSIBLES CASOS DE APLICACION

Se presentan a continuación algunos casos y situaciones en los que el proceso de planeación se encuentra apoyado por la tecnología mostrada a lo largo de todo el trabajo. Estas situaciones se dan ya actualmente y otras son hipotéticas, pero no por ello dejan de ser válidas. En ninguno de estos casos intervienen artículos, informes o libros, son simplemente ideas generadas por la experiencia y creatividad del autor, las cuales quizás sean tomadas por grupos de investigación y ofrecidas a las distintas entidades gubernamentales para la elaboración de proyectos patrocinados, sin beneficio para el que escribe. No obstante, las aplicaciones son tan vastas, que la cantidad de ideas solamente tiene como límite la imaginación humana.

CASO 1. Generación de Planes de Desarrollo Urbano.

El Gobierno de la Ciudad de México requiere de la elaboración de planes que permitan ordenar el territorio de una manera racional para evitar la mezcla de zonas industriales con zonas habitacionales, tratando de guardar una política de protección ecológica para sus pobladores. El mapa catastral de la Metrópoli se encuentra disponible en archivos computarizados para que sea accesado al través de un Sistema de Información Geográfica (GIS). En dicho mapa se tienen detectados los principales usos del suelo de cada una de las manzanas que componen el área urbana, sin embargo, en los últimos años diversos asentamientos han aparecido y no se han registrado por falta de visitas al campo que los identifiquen.

Una imagen SPOT actual de la Ciudad de México, pancromática con una resolución de 10 metros por pixel es suficiente para que, mediante un proceso adecuado, se localicen estos asentamientos y se puedan elaborar los planes de crecimiento urbano conforme a la comparación de esta imagen con alguna otra de la misma ciudad, pero de algún año anterior.

CASO 2. Inventario de Infraestructura Urbana.

Es preciso que las Delegaciones Políticas, en el caso de la Ciudad de México, o bien los Gobiernos Municipales, conozcan la cantidad y el tipo de equipamiento urbano que existe dentro de sus localidades, de tal forma que puedan darse cuenta de la falta de servicios ante las demandas de la población. Una planeación adecuada de infraestructura urbana permite que los recursos financieros puedan ser preparados antes de la aparición de la problemática social que supone la falta de equipamiento. Los diferentes sectores gubernamentales cuentan con el apoyo de la tecnología que se propone en este trabajo, tanto para la realización de un inventario de infraestructura (por medio de una base de datos geográfica), como para la proyección del incremento futuro de la población que va a requerir de tales servicios (análisis de imágenes de satélite).

CASO 3. Estudios de Prospección Demográfica para Servicios Urbanos.

Como ya se mencionó en alguna parte de este trabajo, la superposición de dos o más imágenes satélite de la misma zona tomadas a intervalos grandes de tiempo (5 años como mínimo), aunado a un correcto análisis de procesamiento (substracción de imágenes, filtrado y clasificación supervisada), puede arrojar como resultado el área de expansión urbana en dichos intervalos. Una vez logrado esto, por medio del uso de un GIS, es posible cuantificar el área de expansión, la cual, apoyada en datos de campo que permitan conocer el promedio de habitantes por kilómetro cuadrado dentro de la zona, permite concluir el probable incremento de población por unidad de tiempo. Los parámetros así obtenidos podrán ser utilizados para generar una presupuestación adecuada al momento de planear recursos destinados a la construcción de servicios urbanos tales como electrificación, agua potable, drenaje, etc. (García-Jurado, 1992).

CASO 4. Planeación Forestal.

La Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos requiere conocer una aproximación de la extensión de las áreas que se deforestan indiscriminadamente a lo largo del tiempo, así como el tipo de vegetación que sufre este tipo de devastación, con el fin de planear su reforestación a corto y mediano plazos. El análisis y procesamiento de dos o más imágenes satélite de la misma zona tomadas en diferentes tiempos, permite identificar la aparición de hoyos en áreas boscosas, así como una adecuada clasificación de las imágenes, tomando en cuenta los parámetros de reflectancia de los distintos tipos de árboles existentes, ayuda a conocer la ubicación de dichas áreas y su contenido botánico. El uso posterior de un GIS, arrojará la magnitud de las áreas relacionadas con cada tipo de árbol encontrado, teniendo un conocimiento bastante aproximado del inventario de zonas deforestadas.

CASO 5. Planeación Industrial.

La elaboración de una carta de usos del suelo en zonas urbanas y suburbanas, es una ayuda para la evaluación de proyectos industriales de nueva creación, así como de ampliación de industrias ya establecidas. Por medio de una imagen satélite, es posible inferir una parte del impacto ambiental que tendría la construcción de una nueva planta industrial, ya que con el procesamiento de la imagen, se pueden identificar y cuantificar algunos de los desechos sólidos arrojados por plantas similares existentes. Si tales desechos son arrojados a vertientes fluviales o directamente al mar, el movimiento que generan las corrientes oceánicas provocarán el desplazamiento de los mismos. Las imágenes de satélite permiten hacer un seguimiento a la masa de residuos en movimiento, así como cuantificar su volumen en forma aproximada. Una vez hecho esto, ya resulta factible establecer lo anterior como un parámetro de decisión en la aprobación o rechazo de un proyecto industrial.

CASO 6. Planeación Turística.

Tal como se observó en el capítulo anterior con las imágenes de la bahía de Acapulco, se deduce la posibilidad de identificar zonas atractivas para el turismo por medio de la percepción remota. Cuantificando la longitud de posibles áreas de playa en una imagen costera, se abre la alternativa de planear el establecimiento de hoteles y restaurantes, apoyando así a estudios socio-económicos que permitan predecir la entrada de divisas por concepto de turismo. Si la imagen es lo suficientemente nítida en la banda del infrarrojo cercano, se puede desarrollar una cartografía batimétrica a grandes rasgos para establecer parámetros de seguridad para el turismo.

CASO 7. Planeación de desastres.

En realidad, la frase "planeación de desastres" es incorrecta, ya que los desastres no se planean, mucho menos los naturales, sujetos a variables aleatorias no controlables en lo absoluto. La idea es más bien la *prevención de desastres* dentro de las posibilidades del campo de acción del ser humano. Uno de los motivos de desastre es el deslizamiento de grandes porciones de tierra (taludes), en donde por causa de las lluvias, de movimientos telúricos, o simplemente por erosión superficial, toneladas de material se movilizan a lo largo de un plano de falla y no se detienen hasta que la misma topografía del terreno que las

completas, provocando daños humanos y materiales irreparables. La mayor parte de los deslizamientos cuyo origen se ha investigado, ocurre cerca de ríos, en valles que tienen pendientes suaves. Aún más, se dice que el agua subterránea aportada por las lluvias y los deshielos (en algunos lugares), está fuertemente relacionada con tales deslizamientos. Por medio de una imagen satélite tomada en las bandas visible y del infrarrojo cercano, se pueden detectar cambios importantes en la temperatura superficial del terreno en donde es posible que ocurra un deslizamiento, ya que se ha visto que en las zonas susceptibles de sufrir tal situación, la superficie del talud es más caliente que la del suelo a su alrededor (Shikada, *et al.*, 1993).

CASO 8. Planeación de sistemas de transporte.

La Percepción Remota puede utilizarse en estudios que ayuden a una correcta planeación, si no de los sistemas de transporte en sí, si de los diversos elementos que intervienen en su desarrollo y en el impacto que tienen en su entorno. Así se tiene el caso de investigaciones hechas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en las que se usaron tanto sistemas de procesamiento de imágenes, como sistemas de información geográfica para analizar el impacto que tendría en la logística de distribución de productos y mercancías la construcción de un libramiento al norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Antún, *et al.*, 1993). Dentro de otros estudios se procesaron imágenes de satélite con el fin de relacionar el crecimiento metropolitano con el comportamiento del transporte informal (Antún y Santos, 1991).

5.8

CONCLUSIONES

Basándose en lo establecido en el capítulo anterior y en el actual, en donde se han podido enumerar en forma general las aplicaciones de la percepción remota, es posible agruparlas tal y como aparecen en la figura 5.1.

Lo más importante de todo esto es que la percepción remota ya no es una exclusividad de los países desarrollados. Se ha visto que en México somos capaces de adquirir, desarrollar, aplicar, utilizar y sobre todo, aprovechar estas técnicas para nuestro propio bienestar. Cada vez es mayor el número de investigadores mexicanos que se aventuran en el uso de imágenes para todo tipo de estudios, y cada vez son mayores los logros que se obtienen con esta clase de análisis. Mientras siga siendo una herramienta útil debe seguirse usando, pero hay que tener cuidado en saber cuándo no es posible aplicarla, o cuándo no es útil para los fines que se persiguen, ya que puede suceder que se desee o se tenga que justificar una inversión tan fuerte en sus elementos y se esté obligado a obtener resultados que de ninguna manera son de utilidad, o bien, son mal interpretados, sólo con el afán de presumir técnicas impactantes. La percepción remota es un arma de doble filo. Bien pensada, bien instrumentada y bien operada es una herramienta muy poderosa, pero su uso inconsciente puede llevar a gastos exagerados e inútiles que sólo dañarán la economía de la institución, sin realmente obtener los resultados que se esperaban, o bien, obteniendo dichos resultados, pudiéndolos haber obtenido de alguna otra manera más económica.



Figura 5.1
Aplicaciones de la Percepción Remota

El futuro es promisorio. Es necesario realizar convenios interinstitucionales no solamente dentro de nuestro país, sino también con universidades y centros de investigación del extranjero para que, por ese medio, la materia prima de la percepción remota, es decir, las imágenes, puedan tener una vía de acceso más sencilla y económica. Se propone que existan intercambios académicos y/o tecnológicos que tiendan a favorecernos, así como se reprueba la duplicidad de esfuerzos al existir estudios realizados por grupos de investigación diferentes sobre el mismo tema y utilizando las mismas técnicas. El uso racional de nuestros recursos, tanto humanos, como económicos y materiales, debe ser una de las metas más claras a alcanzar, para así poder ser todo lo eficiente que se necesite.

Como se mencionó en la introducción de este trabajo, la Tierra está esperando ser, ya no digamos estudiada, sino optimizada tanto en sus recursos, como en su utilización; para lo cual es necesario cuidarla y protegerla, dándole un poco de lo mucho que ella nos ha dado. Sus recursos no son infinitos, algunos no pueden ser renovados, y muchos otros requieren de años para renovarse. De nosotros, de nuestra conciencia, de la racionalización que hagamos de ella depende tanto su futuro como el nuestro. La tecnología ha puesto al hombre en dos posturas antagónicas: le ha dado un sitio privilegiado para el control de muchas variables que antes no podían controlarse, a cambio de una destrucción importante, y poco a poco más dramática, de los recursos de su propia casa. Es a esta generación y a las inmediatas siguientes que nos toca jugar el papel primordial en la conservación de nuestros propios recursos. Acciones sin planeación, decisiones sin fundamentos provocarán que la vida en este planeta se limite a unos pocos años a partir de nuestra época.

REFERENCIAS

Antún, J.P. y Santos, C., (1991), **USO DE IMAGENES DE SATELITE EN EL ANALISIS INTEGRADO DEL TRANSPORTE INFORMAL Y EL CRECIMIENTO METROPOLITANO**, Actas del V Simposio Latinoamericano de Especialistas en Percepción Remota, SELPER, Cuzco, Perú.

Antún, J.P., Santos, C. y Lozano, A., (1993), **ESCENARIOS DE IMPACTO DE UNA NUEVA AUTOPISTA EN LA LOGISTICA DE DISTRIBUCION METROPOLITANA**, Actas del VI Simposio Latinoamericano de Especialistas en Percepción Remota, SELPER, Cartagena de Indias, Colombia.

ASP: American Society of Photogrammetry, (1983), **MANUAL OF REMOTE SENSING**, Vol. I, Theory, Instruments and Techniques, Simonett, D.S. (ed.), The Sheridan Press, Virginia, U.S.A.

Barrett, E.C. and Curtis, L.F., (1982), **INTRODUCTION TO ENVIRONMENTAL REMOTE SENSING**. Second Edition, Chapman and Hall, London and New York.

Bryan M.L., (1975), **INTERPRETATION OF AN URBAN SCENE USING MULTI-CHANNEL RADAR IMAGERY**, en Remote Sensing of Environment # 4.

Bryan, N.A. and Zobrist, A.L., (1976), **INTEGRATION OF SOCIO-ECONOMIC DATA AND REMOTELY SENSED IMAGERY FOR LAND USE APPLICATIONS**, en Proceedings of the 2nd. Annual Pecora Symposium. Editado por la American Society of Photogrammetry y el U.S. Geological Survey, U.S.A.

Bunn, D.W., (1984), **APPLIED DECISION ANALYSIS**. McGraw-Hill Book Co. New York, USA.

Burch, J.G. and Grudnitski, G., (1986), **INFORMATION SYSTEMS, THEORY AND PRACTICE**, John Wiley and Sons, New Jersey.

Burrough, P.A., (1986), **PRINCIPLES OF GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS FOR LAND RESOURCE ASSESSMENT**. Clarendon Press, Oxford, U.K.

Bush, P.W. and Collins, W.G., (1974), **THE APPLICATION OF AERIAL PHOTOGRAPHY TO SURVEYS OF DERELICT LAND IN THE UNITED KINGDOM**, en *Environmental Remote Sensing: Applications and Achievements*, Barrett, E.C. and Curtis, L.F. (eds.), Edward Arnold, London, U.K.

Chuvioco, E., (1990), **FUNDAMENTOS DE TELEDETECCION ESPACIAL**. Ediciones RIALP, S.S., Madrid, España.

Cortés, A. y Santos, C., (1992), **INTEGRACION DE IMAGENES SPOT Y FOTOGRAFIA AEREA EN ESTUDIOS URBANOS**, en el boletín bimestral # 8, Enero, de SELPER-México, México, D.F.

Date, C.J., (1986), **AN INTRODUCTION TO DATABASE SYSTEMS**. Cuarta edición, The Systems Programming Series, Addison-Wesley, USA.

Davies, S., Tuyahov, A. and Holz, R.K. (1973), **USE OF REMOTE SENSING TO DETERMINE URBAN POVERTY NEIGHBOURHOODS**, en *Landscape Journal*, U.S.A.

Domitzu, M., (1991), **PDPI, PROGRAMA DE DESPLIEGUE Y PROCESAMIENTO DE IMAGENES**. Presentado en la 2a. Reunión de Comunicaciones y Computación, IEEE, Acapulco, México.

Domitzu, M., Garatuzza, J. y Osuna, J., (1992), **PPI: PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE IMAGENES**, en el boletín bimestral # 13, Noviembre, de SELPER-México, México, D.F.

Dueker, K.J., (1987), **GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND COMPUTER-AIDED MAPPING**, en *Journal of the American Planning Association* # 53 del verano de 1987.

Dueker, K.J. and DeLacy, P.B., (1990), **GIS IN THE LAND DEVELOPMENT PLANNING PROCESS**, en *Journal of the American Planning Association* del otoño de 1990.

Gasparello, E.C., Cardieri, F.L. y Sammarco, F., (1989), **MONITORAMENTO DA EXPANSÃO URBANA NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO, BRASIL**. Presentado en el III Simposio Latinoamericano Sobre Sensores Remotos, SELPER, México, D.F.

García-Jurado, J., (1992), **LA PERCEPCION REMOTA Y EL PROCESAMIENTO DE IMAGENES DIGITALES EN LA PLANEACION URBANA**. Presentado en la 3a. Reunión de Comunicaciones y Computación, IEEE, Acapulco, México.

Giddings, L.E., (1983), **SITUACION MUNDIAL DE LA PERCEPCION REMOTA Y SUS IMPLICACIONES PARA EL TERCER MUNDO**. Presentado en el Seminario Sobre la Percepción Remota en México, Facultad de Ciencias, U.N.A.M., México, D.F.

Gordon, S.I., (1980), **UTILIZING LANDSAT IMAGERY TO MONITOR LAND-USE CHANGE: A CASE STUDY IN OHIO**, en *Remote Sensing of Environment* # 9.

Green, W.B., (1983), **DIGITAL IMAGE PROCESSING, A SYSTEMS APPROACH**. Van Nostrand Reinhold Electrical/Computer Sciences and Engineering Series, New York.

Holz, R.K., Huff, D.L. and Mayfield, R.C., (1969), **URBAN SPATIAL STRUCTURE BASED ON REMOTE SENSING IMAGERY**, en *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, University of Wisconsin, Ann Arbor, Michigan, U.S.A.

Horton, F., (1974), **REMOTE SENSING TECHNIQUES AND URBAN DATA ACQUISITION**, en *Remote Sensing: Techniques for Environmental Analysis*, Estes, J.E. and Senger, L.W. (eds.), Hamilton Publishing Co., Santa Bárbara, California, U.S.A.

Kraus, S.P., Senger, L.W. and Ryerson, J.M., (1974), **ESTIMATING POPULATION FROM PHOTOGRAPHICALLY DETERMINED RESIDENTIAL LAND USE TYPES**, en *Remote Sensing Environment* # 3.

Levine, J. and Landis J.D., (1989), **GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS FOR LOCAL PLANNING**, en *the American Planning Association Journal*, spring 1989, USA.

Lillesand and Kiefer, (1979), **REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION**. John Wiley and Sons, New Jersey.

Lucas, H.C., (1992), **THE ANALYSIS, DESIGN, AND IMPLEMENTATION OF INFORMATION SYSTEMS**. Cuarta edición. McGraw-Hill, New York.

Moore, E.G., (1970), **APPLICATION OF REMOTE SENSORS TO THE CLASSIFICATION OF AERIAL DATA AT DIFFERENT SCALES: A CASE STUDY IN HOUSING QUALITY**, en *Remote Sensing of Environment* # 1.

Negroe, G. y García, J.I., (1988), **LA NECESIDAD DEL PARADIGMA DE SISTEMAS EN PLANEACION**. Presentado en el XVI Congreso Interamericano de Planificación, San Juan de Puerto Rico.

Ochoa, F., (1983), **EL METODO DE LOS SISTEMAS**. Editado por la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

Peralta, R., Peralta, A., Prado, J. y Navarrete, M., (1993), **LA ALTERNATIVA VIDEOGRAMETRICA EN CASOS DE PERCEPCION REMOTA TRADICIONAL**, en el boletín bimestral # 17, Julio, de SELPER-México, México, D.F.

Pratt, T. and Bostian, C.W., (1986), **SATELLITE COMMUNICATIONS**. John Wiley and Sons, New Jersey.

Santos, C., (1992), **INTERACCION ENTRE TRANSPORTE Y LA EXPANSION URBANA IRREGULAR**. Tesis de Maestría en Planeación, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

SELPER-México, (1993), **BOLETIN BIMESTRAL DEL CAPITULO MEXICO** de la Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota. Número 15, Marzo.

Shikada, M., Kusaka, T., Kawata, Y. and Miyakita, K., (1993), **EXTRACTION OF CHARACTERISTIC PROPERTIES IN LANDSLIDE AREAS USING THEMATIC MAP DATA AND SURFACE TEMPERATURE**. Presentado en 1993 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Agosto 18-21, Tokio, Japón.

Solís, P., (1989), **UTILIZACION DE LAS IMAGENES SPOT EN LA DISCRIMINACION DEL SUELO URBANO, EL CASO DE QUITO**. Presentado en el III Simposio Latinoamericano Sobre Sensores Remotos, SELPER, México, D.F.

Trevett, J.W. (1986), **IMAGING RADAR FOR RESOURCES SURVEYS**, Chapman and Hall, London, U.K.

Valenzuela, C.R., (1991), **BASIC PRINCIPLES OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS**, en Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries, Kluwer Academic Publishers, Holanda.

Welch, R., (1980), **MONITORING URBAN POPULATION AND ENERGY UTILIZATION PATTERNS FROM SATELLITE DATA**, en Remote Sensing of Environment # 9.

Wiggins, L.L. and French, S.P., (1988), **THEMATIC MAPPING PACKAGES FOR MICROCOMPUTERS**, en Planning American Society Report 414/415, A Planners Review of PC Software and Technology.