



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E
INGENIERÍA**

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA

**DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE
OBTENCIÓN DE UN SISTEMA DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

MONOGRAFÍA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

P R E S E N T A:

**P.D.I.I. OBREGÓN AGUILAR
FERNANDO.**

DIRECTOR: ING. ROBERTO PICHARDO CABRERA.

**CD. UNIVERSITARIA, MINERAL DE LA REFORMA HIDALGO,
NOVIEMBRE 2007.**

ÍNDICE.

ÍNDICE.	I
ÍNDICE TABLAS Y FIGURAS.	V
OBJETIVO GENERAL.	1
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	1
JUSTIFICACIÓN.	2
INTRODUCCIÓN.	3
CAPÍTULO 1.	6
HISTORIA DE LA CARTOGRAFÍA.	6
1.1. INTRODUCCIÓN.	6
1.2. MAPAS ANTERIORES AL SIGLO XVIII.	8
1.3. COORDENADAS GEOGRÁFICAS.	16
1.3.1. RED DE MERIDIANOS Y PARALELOS DEL MAPA.	16
1.3.2. EL PROBLEMA DE LA DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD EN LA NAVEGACIÓN.	17
1.3.3. LÍNEAS DE RUMBO SOBRE LA ESFERA.	19
1.3.2. GEODÉSICAS SOBRE LA ESFERA.	21
1.4. TIPOS DE PROYECCIÓN.	22
1.4.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE UN PUNTO.	22
1.4.2. LA PROYECCIÓN U.T.M.	23
1.4.2.1. PROYECCIONES PLANAS.	25
1.4.2.2. PROYECCIONES GEODÉSICAS.	26
1.5. LA PROYECCIÓN MERCATOR TRANSVERSAL.	27
1.5.1. LÍNEAS LOXODRÓMICAS Y ORTODRÓMICAS.	31
1.5.2. VENTAJAS DEL SISTEMA U.T.M.	33
CAPÍTULO 2.	35
LA FOTOGRAMETRÍA.	35
2.1. INTRODUCCIÓN.	35
2.1.1. DEFINICIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA.	36
2.2. FUNDAMENTOS DE LA FOTOGRAMETRÍA.	36
2.3. ETAPAS DE LA FOTOGRAMETRÍA.	37
2.4. RECUENTO HISTÓRICO.	42
2.5. APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA.	43
2.6. VENTAJA DE LA FOTOGRAMETRÍA.	44
2.7. DESVENTAJAS DE LA FOTOGRAMETRÍA.	45
2.8. DIVISIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA.	46
2.8.1. FOTOGRAMETRÍA AÉREA.	46
2.8.2. FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE.	47
2.9. PRODUCTOS DE LA FOTOGRAMETRÍA.	48

2.9.1 MAPA DE LÍNEAS.	48
2.9.2. PUNTOS DE CONTROL.	48
2.9.3. FOTOMOSAICO.	48
2.9.4. ORTOFOTO.	49
2.9.5. ORTOFOTO. ESTEREOSCÓPICA.	49
2.9.6. ORTOFOTOMAPA.	49
2.9.7. PRODUCTOS PARA ILUSTRACIÓN ESTEREOSCÓPICA.	49
2.10. LA VISIÓN ESTEREOSCÓPICA.	50
CAPÍTULO 3	51
PLANIFICACIÓN DE UN PROYECTO FOTOGRAMÉTRICO.	51
3.1 INTRODUCCIÓN.	51
3.2. PLANIFICACIÓN DEL VUELO.	52
3.2.1. PROPÓSITO DE LA FOTOGRAFÍA.	54
3.2.2. ELECCIÓN DE LA ESCALA DE LA FOTOGRAFÍA.	55
3.2.3. ALTURA DE VUELO. NIVEL DE REFERENCIA.	56
3.2.4. DISPOSICIÓN DE LAS FOTOGRAFÍAS. RECUBRIMIENTOS.	57
3.2.4.1. RECUBRIMIENTO LONGITUDINAL.	57
3.2.4.2. RECUBRIMIENTO LATERAL (BLOQUES DE BANDAS PARALELAS)	60
3.2.5. LA DERIVA	61
3.2.6. PLANIFICACIÓN DEL VUELO EN TERRENO MONTAÑOSO	64
3.2.7. MAPA DE VUELO	67
3.2.8. LOS PARÁMETROS DE UN VUELO VERTICAL.	68
3.2.9. MÉTODOS DE NAVEGACIÓN FOTOGRÁFICA.	72
3.2.9.1. NAVEGACIÓN A SIMPLE VISTA CON CARTOGRAFÍA DISPONIBLE.	72
3.2.9.2. NAVEGACIÓN A SIMPLE VISTA SIN CARTOGRAFÍA PREVIA.	72
3.2.9.3. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN AVANZADOS.	74
3.2.10. CONDICIONES PARA LA TOMA DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS.	75
3.2.11. RESULTADOS DIRECTOS DE LA TOMA FOTOGRÁFICA NEGATIVOS.	76
3.2.12. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.	76
CAPÍTULO 4.	78
CONTROL TERRESTRE. (PUNTOS DE APOYO).	78
4.1 INTRODUCCIÓN.	78
4.1.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO FOTOGRAMÉTRICOS.	79
4.1.2. ELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO FOTOGRAMÉTRICOS.	80
4.1.3. PRE SEÑALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYOS.	81
CAPÍTULO 5.	83
LA AEROTRIANGULACIÓN.	83
5.1 INTRODUCCIÓN	83
5.2. FASES DE QUE CONSTA EL PROCESO DE AEROTRIANGULACIÓN.	86
5.2.1. FASE DE PREPARACIÓN.	86
5.2.1.1. RECEPCIÓN DEL MATERIAL.	87
5.2.1.2. ELECCIÓN, NUMERACIÓN Y SEÑALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL MENORES.	88
5.2.1.3. PREPARACIÓN DEL MAPA ÍNDICE DE MODELOS O CANEVÁS GENERAL.	95

5.2.2. FASE DE CAPTURA INSTRUMENTAL DE DATOS.	95
5.2.3. FASE DE PROCESAMIENTO DE DATOS.	96
5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE TRIANGULACIÓN AÉREA.	99
5.4. PRINCIPIO DE LA TRIANGULACIÓN AÉREA ESPACIAL.	101
5.5. FUENTES DE ERROR EN LA TRIANGULACIÓN AÉREA.	104
5.6. APLICACIONES DE LA TRIANGULACIÓN AÉREA.	105
CAPÍTULO 6.	107
RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA.	107
6.1 INTRODUCCIÓN.	107
6.1.1 ORIENTACIÓN INTERNA.	109
6.1.2 ORIENTACIÓN EXTERNA O EXTERIOR.	110
6.2 ORIENTACIÓN RELATIVA.	111
6.2.1 MÉTODOS GRÁFICOS O EMPÍRICOS DE ORIENTACIÓN RELATIVA.	114
6.3 ORIENTACIÓN ABSOLUTA.	116
6.3.1. ESCALA DEL MODELO.	117
6.4. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL. LA IMAGEN DIGITAL.	119
6.4.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA UTILIZACIÓN DE IMÁGENES EN FORMATO DIGITAL EN FOTOGRAMETRÍA.	119
6.5 EL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL.	121
6.5 EL PROCESO DE CAPTURA DE IMÁGENES.	122
6.5.1 SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS DIGITALES.	125
6.5.1.1. SISTEMA DE VISUALIZACIÓN.	125
6.5.2. APLICACIONES.	128
CAPITULO 7.	130
LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	130
7.1. CARTOGRAFÍA DIGITAL.	130
7.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	134
7.3. BASES DE DATOS.	136
7.4 PROGRAMAS.	137
7.5. USUARIOS.	138
7.6 UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	140
7.6.1. ALMACENAMIENTO.	140
7.6.2 VISUALIZACIÓN.	140
7.6.3 CONSULTAS.	141
7.6.4 ANÁLISIS.	142
7.6.5 TOMA DE DECISIONES.	142
7.6.6 MODELIZACIÓN.	143
7.7. APLICACIONES DE LOS S.I.G.	144
7.8 INFRAESTRUCTURAS DE DATOS ESPACIALES.	145
7.9 EL SISTEMA GPS.	147
7.10. LOS S.I.G ¿CIENCIA O HERRAMIENTA?	149
CAPÍTULO 8.	151
MODELOS Y ESTRUCTURAS DE DATOS.	151
8.1 INTRODUCCIÓN.	151

8.1.1 EL MODELO CONCEPTUAL. ENTIDADES Y VARIABLES	154
8.1.2. SUPERFICIES.	156
8.1.3. ENTIDADES.	157
8.2. MODELOS LÓGICOS. FORMATO RASTER Y VECTORIAL.	159
8.2.1. REPRESENTACIÓN DE SUPERFICIES, VARIABLES CUALITATIVAS Y ENTIDADES.	161
8.2.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FORMATOS RASTER Y VECTORIAL.	163
8.2.3. ESCALA Y MODELOS LÓGICOS DE DATOS.	164
8.3. EXACTITUD, PRECISIÓN Y ERROR.	165
8.4. EL FORMATO RASTER. FUNDAMENTOS.	166
8.4.1. ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA CAPA RASTER.	166
8.4.2. VISUALIZACIÓN Y CONSULTA DE CAPAS RASTER.	170
8.4.3. ASCII Y BINARIO.	171
8.5 FORMATO VECTORIAL. ANÁLISIS ESPACIAL	173
8.5.1. MODELOS DIGITALES VECTORIALES.	175
8.2.1. MODELO VECTORIAL EN ARCIINFO.	176
CAPITULO 9.	178
APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	178
9.1. INTRODUCCIÓN.	178
9.2 DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	179
9.2.1 COMPONENTES DE UN S.I.G.	181
9.3 FUNCIONAMIENTO DE LOS S.I.G.	183
9.4 CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS GEOGRÁFICAS.	184
9.5 TOPOLOGÍAS, MODELOS DE DATOS Y TIPOS DE S.I.G.	186
9.6. ALCANCES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	187
9.7. TECNOLOGÍAS RELACIONADAS CON LOS S.I.G.	188
9.8. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	189
9.3. EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS TECNOLÓGICOS Y SU APLICACIÓN EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	192
CONCLUSIONES.	195
BIBLIOGRAFÍA.	196
DOCUMENTOS ELECTRÓNICOS.	196
GLOSARIO DE TÉRMINOS	198

ÍNDICE TABLAS Y FIGURAS.

1. 1. Mapa de Eratóstenes.....	8
1. 2. Mapa de Ptolomeo (según la primera de sus proyecciones "pseudocónica") en una edición del Siglo XV.	10
1. 3. Mapa Ptolomeico (según la segunda de sus proyecciones). Edición de Ulm de 1482	10
1. 4. Mapa medieval de "T en O" que aparece en la obra "Etimologías" de Isidoro de Sevilla (560-636).....	11
1. 5. Carta portulana elaborada por Angelino Dulcert, Mallorca 1339.	12
1. 6. Fragmento del mapa portulano realizado por Abraham Cresques en 1375.....	13
1. 7. Mapa de G. Mercator (1569) elaborado según la proyección que llevaría su nombre a partir de entonces.	14
1. 8. Mapamundi (Typus orbis Terrarum) de A. Ortelius publicado en 1570 en la colección de mapas (Theatrum Orbis Terrarum).	14
1. 9. Representación de una línea de rumbo (o loxodromo) sobre una esfera	19
1. 10. Triángulo geodésico en geometría esférica.	21
1. 11. Representación plana de la tierra.....	23
1. 12. Proyecciones cartográficas.	24
1. 13. Proyección Plana.....	25
1. 14. Proyección Mercator.	27
1. 15. Proyección Universal Transversal Mercator	28
1. 16. Relación entre las distancias reales y las proyectadas	1
1. 17. Transformación geométrica	1
1. 18. Líneas Loxodrómicas y Ortodrómicas vista sobre el globo terráqueo	¡Error! Marcador no definido.
1. 19. Líneas Loxodrómicas y Ortodrómicas.	32
1. 21. Cobertura UPS	34
1. 20. Proyección UPS	34
2. 1. Visión Estereoscópica y Marca Medidora en un Restituitor Mecánico	38
2. 2. Restitución Análoga.....	39
2. 3. Restituitor Mecánico (preparado en base a 6).....	39
2. 4. Restituitor Analítico zeiss p3.	40
2. 5. Restitución Digital, softplotter.....	41
2. 6. Fotografía Aérea.....	46
2. 7. Estereoscopio.....	50
3. 2. Distancia Principal C2	54
3. 1. Distancia principal C1	33
3. 3. Relación entre escala, imagen y plano	55
3. 4. Toma fotográfica aérea	56
3. 5. Toma fotográfica de un modelo	33
3. 6. Superficie cubierta por la fotografía.....	33
3. 7. Ejecución del vuelo fotogramétrico ideal.....	58
3. 8. Variaciones de Altura de Vuelo.....	58
3. 9. Inclinación del eje Vertical.	59
3. 10. El relieve del terreno.	59
3. 11. Recubrimiento transversal entre pasadas adyacentes	60
3. 12. Efecto de la fuerza del viento (deriva) sobre la trayectoria verdadera.....	61
3. 13. Efecto de la deriva en una pasada	62
3. 14. La deriva se presenta en la dirección de vuelo por diferentes factores atmosféricos.....	62
3. 15. El aire pega en las alas del avión; a este movimiento se le conoce como alabeó.	63
3. 16. Vuelo Fotogramétrico y ajuste de la cámara.....	63
3. 17. Defectos producidos en el recubrimiento longitudinal.	64
3. 18. Determinación de los desniveles admisibles.....	64
3. 19. Vuelo con disminución del recubrimiento transversal.	65

3. 20. Planificación del vuelo con variaciones en el espaciado entre líneas de vuelo.	66
3. 21. Planificación del vuelo con variaciones en la altura de vuelo entre pasadas.	66
3. 22. Ejes de vuelo con orientación N-S y E-O.	67
3. 23. Planificación de un vuelo fotogramétrico sobre una zona de terreno lineal.	68
3. 24. Disposición ideal de fotogramas.	69
Tabla 3. 1. Velocidad del avión Vs tiempo de obturación de la cámara.	71
3. 25. Vuelo de franjas entrelazadas.	73
4. 1. Distribución de los puntos de control terrestre.	79
4. 2. Control a lo largo de todos los bordes del bloque y después de la 3ra foto de cada línea	80
4. 3. Los GPS se ocupan en apoyo terrestre.	82
4. 4. Puntos tomados por apoyo terrestre	82
5. 1. Wild -a7.	85
5. 2. ZEISS C-8.	85
5. 3. Puntos de control Planimétrico.	88
5. 4. Puntos de control altimétrico.	88
5. 5. Numeración de puntos.	89
5. 6. Bloque de Imágenes Enumeradas.	91
5. 7. Transferidor de puntos, Wild PUG-4.	92
5. 8. Señalización de los puntos en cada imagen	93
5. 9. Localización de puntos en dos modelos adyacentes.	94
5. 10. Señalización de los puntos en cada imagen	94
5. 11. Mapa General del bloque fotogramétrico (mapa índice).	95
Tabla 5. 1. Esquema de la fase de adquisición y procesamiento de datos según Jordan, Eggert y Kneissal. .	98
5. 12. Instrumento de proyección óptica (Multiplex).	101
5. 13. Orientación del primer modelo.	102
5. 14. Orientación del segundo modelo.	102
5. 15. Modelos a idéntica escala	103
5. 16. Formación de la pasada.	103
6. 1. Posiciones sucesivas del avión.	108
6. 2. Parámetros de control de cada proyector.	108
6. 3. Elementos de la orientación exterior	111
6. 4. Desplazamientos en el modelo, entre dos puntos homólogos.	112
6. 5. Distribución de los puntos en el modelo, para la eliminación de las paralajes verticales.	112
6. 6. Influencia de los distintos elementos de orientación, en la formación de paralajes en el plano.	113
6. 7. Paralaje debido al elemento X.	114
6. 8. Paralaje debido al elemento Φ	115
6. 9. Paralaje debido al elemento ω	115
6. 10. Relaciones métricas entre par fotográfico y el modelo	117
6. 11. Efecto de la variación de la base en la formación de la escala del modelo, y su puesta en escala.	118
6. 12. La imagen digital. Izq.: Fragmento de una fotografía aérea en formato digital. Der: Ampliación de un elemento de la imagen -casa-.	119
6. 13. Proceso fotogramétrico.	121
Tabla 6. 1 Sistemas de visión estereoscópica en restituidores digitales.	126
6. 14. Visión estereoscópica por polarización pasiva. Las imágenes se presentan alternativamente a una velocidad de 120Hz usando una pantalla de polarización. La visión se obtiene mediante la utilización de gafas pasivas (Schenk, 1995).	127
6. 15. Visión estereoscópica por polarización activa. Las imágenes se presentan alternativamente a una frecuencia de 120 Hz y la visualización se realiza mediante gafas activas sincronizadas con el sistema (Schenk, 1995).	127
7. 1. Sistemas de información geográfica y su entorno.	133

7. 2. Capas de información espacial.	136
7. 3. Funcionamiento de GPS.....	149
8. 1. Curvas de nivel.....	151
8. 2. Esquema de la modelización de datos en S.I.G.....	153
8. 3. Realidad.....	154
8. 4. Superficie.	155
8. 5. Objetos.....	155
8. 6. Representación de objetos (carreteras, red de drenaje, núcleos urbanos y límites municipales) en un S.I.G.	156
8. 7. Tipos de objetos en formato vectorial a) Punto, b) Línea, c) Polígono en formato nodo, d) Polígono en formato Arco-Nodo	158
8. 8. Modelos lógicos para representar superficies.	161
8. 9. Modelos lógicos para representar variables cualitativas.	162
8. 10. Modelos lógicos para representar entidades.	163
8. 11. Modelos digitales. Codificación de una variable cuantitativa en formato raster.....	168
8. 12. Modelos digitales. Codificación de una variable cualitativa en formato raster.	169
8. 13. Código ASCII.....	172
8. 14. Modelo de datos Geo-relacional.....	175
8. 15. Formato vectorial Vs Raster.	185
8. 16. Organización de la información en el modelo raster.....	186
9. 1. Mapa de Zonificación de riesgos tecnológicos en la zona una industrial.....	194

OBJETIVO GENERAL.

Describir El Proceso de obtención de un Sistema de Información Geográfica, El cual permite el acceso, transformación y manipulación interactiva de Información Geográfica, con un propósito particular, que permitan mejorar la toma de decisiones a los diversos problemas sociales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- ⊕ Analizar los principales aspectos teóricos que intervienen en la Cartografía, a través del análisis de las proyecciones cartográficas.
- ⊕ Conocer los alcances de la fotogrametría que permitan avanzar en el uso de técnicas de análisis y estudios de los S.I.G.
- ⊕ Comprender como se elabora el vuelo fotogramétrico, que nos permita obtener una adecuada cobertura fotográfica, en la zona de estudio.
- ⊕ Describir como se utiliza los sistemas de posicionamiento global para obtener el proceso de aerotriangulación que permita realizar la orientación interna y externa de un modelo estereoscópico.
- ⊕ Describir el proceso de restitución fotogramétrica de un par estereoscópico de imágenes; para la extracción de la información vectorial.
- ⊕ Definir como se estructuran los S.I.G y sus componentes vectoriales y raster.
- ⊕ Conocer las utilidades que tiene un S.I.G y como funcionan en la vida diaria.

JUSTIFICACIÓN.

Los sistemas de información geográfica son una herramienta que en la actualidad se ha hecho necesaria en diferentes campos del saber, porque ofrece técnicas sencillas para el estudio de variables espaciales y búsqueda de relaciones entre ellas.

El aporte de los S.I.G, consiste en permitir caracterizar los datos tanto en forma temporal, como espacial y considerar sus atributos para llevar a cabo análisis complejos multitemáticos.

Estos son precisamente los análisis requeridos en el manejo de recursos naturales; Los S.I.G están siendo actualmente utilizados, en forma rutinaria, por investigadores en diferentes disciplinas.

Para el manejo de los recursos naturales el S.I.G es una tecnología muy útil, debido a que garantiza una toma de decisiones de mayor calidad y con más conocimiento, pues se apoya en información espacial útil y, además, permite el modelamiento de escenarios de la interacción hombre-naturaleza, de gran importancia para el diagnóstico y el manejo de las problemáticas existentes.

La geografía (y los datos que sirven para cuantificarla) forma ya parte de nuestro mundo cotidiano; la mayoría de las decisiones que tomamos diariamente están en relación con o influenciadas por un hecho geográfico.

Diariamente, miles de empresas, industrias y gobiernos alrededor del mundo, utilizan la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica para ayudar a resolver complicados problemas y mejorar nuestra calidad de vida.

La importancia del S.I.G para el manejo de los recursos naturales, está también relacionada con la facilidad de representar, a través de productos gráficos, los datos que con otros Medios tradicionales (listados de datos o gráficas de comportamiento de las variables en el Tiempo), se hacía difícil aprovechar y explotar de manera intensiva.

Los S.I.G han entrado en los campos de la política pública, planeamiento regional, negocios, La vida militar y privada y, por tanto, sus efectos son muy grandes y no pueden ser dejados un lado.

De allí que la presente monografía se abordará una perspectiva más amplia de cómo se integra un S.I.G, que permitirá obtener conocimiento de esta herramienta y su aplicación con perspectivas más amplias, sobre los impactos sociales de la tecnología.

INTRODUCCIÓN.

Desde finales de los ochenta los sistemas de información geográfica (S.I.G) se han convertido en un tema en rápida expansión.

Prueba de ello es la gran cantidad de publicaciones que han ido apareciendo y que cada día somos más las personas que nos incorporamos a todos aquellos que trabajan con esta herramienta, especialmente en actividades relacionadas con el medio ambiente.

Los S.I.G se utilizan para resolver toda clase de cuestiones de planificación y gestión regional, urbana o rural, de grandes o pequeñas zonas geográficas, gestión catastral, explotación de recursos naturales, etc. Su aplicación al estudio de los peligros y riesgos geológicos también es muy amplia.

En la actualidad es muy común ver un mapa e identificar en él rasgos del territorio que se nos hacen familiares.

Pero no siempre fue así, en la antigüedad los primeros seres humanos vieron la necesidad de comunicar a sus familiares en donde poder encontrar agua, alimento, animales de caza y otras características importantes del terreno en donde vivían.

Con el paso del tiempo, hubo necesidad de perpetuar esos conocimientos, comenzaron pintando en las paredes de sus cuevas, pero como tenían necesidad de llevar consigo la forma de llegar a un punto determinado en el terreno, comenzaron a elaborar esos croquis en pieles de animales.

Estos croquis del lugar, fueron haciéndose más precisos conforme avanzaba la ciencia; y conforme crecían las civilizaciones era necesario tener un mapa que tuviera en él la forma que tomaban los territorios de un imperio. A partir de este momento nace la cartografía como ciencia.

Hoy en día, la utilización de estos mapas impresos se hace cada vez más obsoleta y se ve desplazada por nuevas tecnologías, que por su sencillez y facilidad de interpretación facilitan la ubicación de puntos sobre la superficie de la tierra.

Estas tecnologías, la mayoría de ellas vía satélite, han ayudado al hombre desde materias como la milicia o la explotación de recursos naturales hasta el salvamento de personas víctimas de accidentes o desastres naturales.

En pocas palabras, la cartografía ha hecho la vida del ser humano más fácil, ya que con ella los habitantes de una región conocen a la perfección su territorio y pueden de esta manera, saber con seguridad en donde obtener recursos naturales o donde construir viviendas de forma segura.

La cartografía o trazado de mapas es, al mismo tiempo, un conjunto de técnicas y una materia de estudio académico. La realización de mapas en el pasado requería de:

- ④ Saber encontrar y seleccionar la información sobre diferentes aspectos de la geografía a partir de fuentes diversas, para después sintetizar los resultados en un único grupo de datos consistente y preciso.
- ④ Técnicas y habilidades de diseño con el fin de crear un mapa final que consiga representar con fidelidad la información, para que los lectores, que poseen diferentes grados de habilidad en la lectura de mapas, puedan interpretarlo correctamente.
- ④ Destreza manual y técnica de diseño gráfico para simplificar y dibujar la información mediante símbolos, líneas y colores, de modo que el amontonamiento o el desorden sean mínimos y el mapa resulte legible.
- ④ Pero no existe un modo correcto de trazar mapas. El modo depende de las herramientas de las que dispone el cartógrafo, del propósito del mapa y de la base de sus conocimientos. Sin embargo, sí existen diversos métodos empíricos que pueden servir de guía al cartógrafo.

El uso generalizado de las computadoras ha dado paso al desarrollo de un nuevo grupo de instrumentos denominados Sistemas de Información Geográfica o S.I.G. El primero se creó en Canadá en 1965 con el fin de realizar un inventario sobre la fauna y flora de todo el país. Actualmente, existen muchos miles en funcionamiento en el mundo y su número está creciendo aproximadamente un 20% anual.

Pero la verdadera ventaja de los S.I.G es que son los únicos instrumentos que pueden juntar la información geográfica que se han recogido de forma independiente por diferentes instrumentos (digitalizando, con bases de datos, escáner, etc.) y desde diferentes organizaciones, que tradicionalmente elaboraban esa información sólo para sus propios fines.

Los S.I.G superponen capas con un tipo de información determinada en cada una de ellas, registrando las características de áreas comunes. Si existen dos grupos de datos de un país, como por ejemplo suelos o productividad de los cultivos, tenemos una combinación. Sin embargo, si existen 20 grupos de datos diferentes tendríamos 120 pares de combinaciones y más de un millón de combinaciones en total. Gracias a estos sistemas podemos fusionar todas las capas en una sola y, así, utilizarse para muchos más fines que si estuvieran recogidos en bases de datos independientes.

Pero, ¿qué supone esto para la cartografía? En primer lugar constituye un verdadero desarrollo para las organizaciones cartográficas estatales, ya que asegura que sus datos se utilizarán con mayor amplitud. Pero los efectos del S.I.G van mucho más allá.

Por ejemplo, el mapa tradicional, aunque contiene grandes cantidades de información y es más apto para la utilización sobre el terreno, presenta dificultades a la hora de extraer de él diferentes tipos de información y de combinar ésta para darle un sentido y adaptarse a las necesidades individuales.

Por otro lado, el mapa Sigue siendo el mejor método de representar las variaciones geográficas de un modo que pueda ser comprendido con rapidez por diferentes personas.

La combinación de un S.I.G, “instrumento para explorar, seleccionar y analizar la información”, con la cartografía automatizada está asegurando la rápida expansión de los mapas digitales en donde interviene, software, hardware, datos, usuarios y personal para su elaboración.

Más allá de ser una herramienta informática de grandes alcances, los Sistemas de Información Geográfica pueden constituirse, en un instrumento de toma de decisiones indispensable en temas como el de la conservación de la biodiversidad; al ser capaces de construir modelos cartográficos o representaciones del mundo real a partir de bases de datos georeferenciados, los S.I.G funcionan como una disciplina integradora y analítica de información múltiple que brinda la posibilidad de realizar una investigación y planificación basada en los hechos y circunstancias que se identifican en cada zona estudiada; la cual permitirá –entre otras cosas– tomar mejores decisiones en temas como el de desarrollo rural y urbano.

En el capítulo 9 abordamos el de control de riesgos ya que es el factor primordial es la identificación del elemento de riesgo en sí mismo. Cuando se trata del control de inundaciones los estudios convencionales de detalle resultan demasiado costosos, tanto en tiempo como en dinero, por lo recurrir a la automatización mediante S.I.G del proceso de identificación de áreas inundables resulta especialmente interesante.

A partir de un MDE se obtiene información relevante de la cuenca, y se conjuga con otras coberturas de especial interés (hidrología, hidráulica, vegetación, usos el suelos, etc.). Cuanto más preciso sea el MDE más acertado será, indudablemente, la definición de estas áreas, por lo que puede optarse por generar el MDE a partir de la topográfica convencional o de información de satélite. Se calculan los niveles de inundación a partir de niveles de descarga, y conjugando estos valores con inventarios de episodios de inundación acaecidos, pueden pulirse imperfecciones y ajustarse las definiciones.

CAPÍTULO 1.

HISTORIA DE LA CARTOGRAFÍA.

1.1. INTRODUCCIÓN.

La representación de la superficie esférica terrestre sobre un mapa plano conlleva necesariamente una distorsión en área, forma, escala,...Según la finalidad del mapa se imponen determinadas condiciones (conservación de ángulos, de áreas,...) lo cual determina un tipo de proyección.

La elaboración de un mapa supone la localización geográfica de los puntos terrestres mediante coordenadas geográficas: latitud y longitud.

La transformación matemática o geométrica de esa localización en posiciones sobre un mapa plano está determinada por el tipo de proyección. Precisamente, la cartografía matemática es el estudio de las proyecciones para elaborar mapas.

Históricamente uno de los primeros pasos en la elaboración de mapas es considerar una red de meridianos y paralelos terrestres o líneas de longitud y de latitud, respectivamente. No obstante, el hecho de que hasta el Siglo XVIII la medida de la longitud geográfica en el mar no fuera precisa no impidió el desarrollo de diferentes tipos de proyecciones.

Aunque la esfericidad de la tierra se negó durante la Edad Media muchos científicos y filósofos antiguos aportaron argumentos racionales para apoyar la afirmación de que la tierra tiene, básicamente, forma de esfera. Por ello, algunos tipos de proyecciones de una esfera en un plano se conocían desde la época griega. Por ejemplo, la proyección estereográfica (principalmente utilizada en astronomía), la proyección gnómica (utilizada para elaborar relojes de sol) y las proyecciones cónicas de Ptolomeo.

La transición de la Edad Media al Renacimiento supuso un cambio notable en el concepto de proyección cartográfica.

El desarrollo de las matemáticas fue contemporáneo al desarrollo de la cartografía. Antes del Renacimiento (antes de 1470) se conocían una docena de proyecciones cartográficas.

En los dos Siglos Sigüientes se desarrollaron o se mejoraron otros diez tipos. La mayoría se desarrollaron con el fin de reducir la distorsión del mapa, al menos para la región que se proyectaba. Sin embargo, la proyección de Mercator (1569) presenta características que no presentaban otras proyecciones.

Esta proyección involucra la $\int \sec \theta d\theta$ Cuya primitiva es $\ln \left| \tan \frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4} \right|$
Sin embargo, Mercator desarrolló la proyección que lleva su nombre antes de la aparición del cálculo diferencial e integral y antes de la aparición de los logaritmos.

Algunas proyecciones importantes, como la proyección estereográfica, pueden construirse de forma geométrica. Sin embargo, no es posible una construcción geométrica en otras muchas como la proyección de Mercator. El cálculo fue aplicado por primera vez en cartografía por Lambert (1772) desarrollando nuevos tipos de proyecciones. Cuando se aplica a una proyección cartográfica ya existente, el cálculo diferencial se utiliza para calcular el factor de escala¹

En una determinada dirección en un punto dado lo cual determina la distorsión en ese punto. El calculo integral permite obtener la expresión matemática para una proyección a partir de una condición en la distorsión.

Una de las preocupaciones de Lambert era encontrar proyecciones que a escala infinitesimal no tuvieran distorsión en los ángulos, es decir, en un punto dado del mapa la escala fuera la misma en todas las direcciones. Las proyecciones que presentan esta propiedad se denominan conformes (u ortomórficas). Gauss resolvió el problema de la transformación conforme de una superficie en otra en 1825. El tratamiento matemático riguroso de este concepto se asocia con las ecuaciones de Cauchy-Riemann. A finales del Siglo XIX los trabajos del matemático francés Tissot culminaron en la teoría de la distorsión de las proyecciones terrestres.²

1 Podemos imaginar la proyección de la esfera terrestre en el plano en dos fases. En la primera el globo terrestre se reduce a otra superficie esférica. La razón de semejanza entre los radios de ambas superficies es la escala principal o nominal. En el segundo paso, el globo reducido se proyecta matemáticamente sobre el plano. La escala real a la que aparecen las distancias sobre el mapa no coincidirá, en general, con la escala nominal ya que la superficie de la esfera no es "desarrollable". Se define el factor de escala como el cociente entre la escala real y la escala principal. Por tanto, el factor de escala será 1 a lo largo de aquellas direcciones o en aquellos puntos en los que se haya mantenido la escala principal. En general, el factor de escala en un punto determinado puede ser diferente según la dirección.

2 En cada punto de la esfera hay un número infinito de pares de direcciones ortogonales entre sí. Cuando se transforma en un plano dichos pares no se transforman necesariamente en direcciones ortogonales. Un teorema formulado por Tissot establece que dada cualquier transformación de la superficie esférica existe, al menos, un par de direcciones ortogonales que continúan siendo ortogonales después de la transformación (direcciones principales).

1.2. MAPAS ANTERIORES AL SIGLO XVIII.

Los mapas actuales se basan en la cartografía matemática que se inició en Grecia. Se atribuye a Tales de Mileto (Siglo VII-VI a.C) la idea de la esfericidad de la tierra. A comienzos del Siglo IV a.C Pitágoras apoya esta afirmación con razonamientos astronómicos y matemáticos. Aristóteles (Siglo IV a.C) apunta, también, seis argumentos físicos y lógicos que apoyan la idea de que la Tierra tiene forma de esfera.

Eratóstenes de Cirene (276-194 a.C) fue el primero en medir el meridiano terrestre comparando la inclinación de los rayos solares en Alejandría y Siena (Assuán) durante el solsticio de verano.

Su medida de 39500 km resulta muy aproximada a los 40000 km que mide. Sin embargo, Posidonio de Rodas (135-50 a.C) creyó encontrar un error en el cálculo de Eratóstenes y redujo éste a 28400 Km. El resultado de Posidonio pasó a los geógrafos posteriores y llegó incluso hasta el Siglo XV.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra una recreación del mapa de Eratóstenes (Siglo III a.C). En el extremo norte figura la isla de Thule³ que aparecerá frecuentemente en la cartografía hasta la Edad Media y que ha sido identificada con Islandia y con las costas de Noruega.

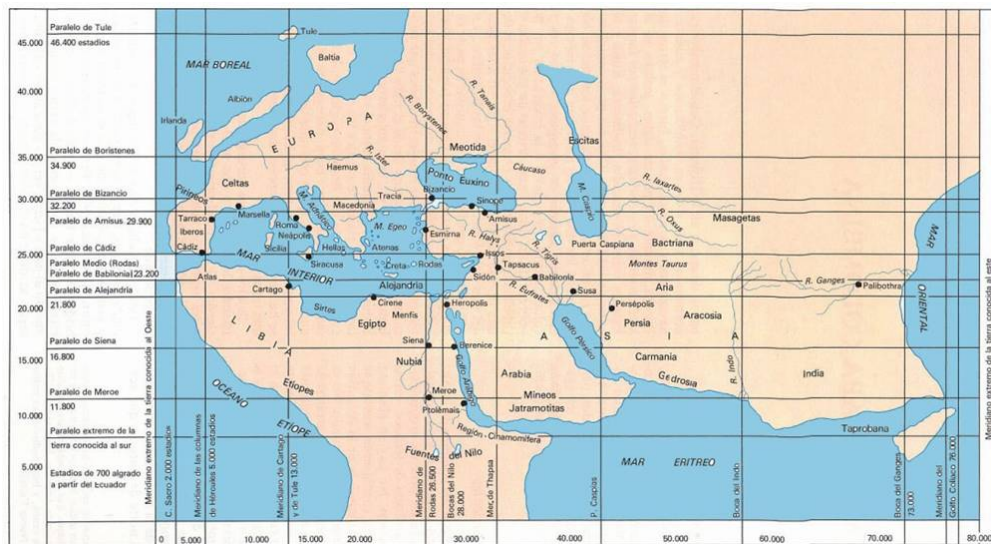


Figura 1. 1. Mapa de Eratóstenes

Hiparco de Rodas (190-125 a.C) introdujo en Grecia el sistema sexagesimal

³ En el año 330 a.C Pitias parte de Marsella con el objetivo de determinar las latitudes de regiones remotas. En la descripción de sus viajes menciona el territorio de Thule.

babilónico y realizó un gran catálogo de estrellas, fundamental en la navegación para marcar los rumbos.

La obra que más influencia ejerció en la cartografía islámica y renacentista europea fue la Geografía de Ptolomeo (Siglo I d.C). Esta obra consta de ocho volúmenes: el primero está dedicado a la construcción de globos terrestres; los tomos II a VII detallan las coordenadas geográficas de 8000 lugares; en el VIII expone dos tipos de proyecciones cartográficas que están consideradas más abajo.

La cultura árabe se convirtió durante la Edad Media en la continuadora del desarrollo científico interrumpido en Europa.

La recuperación en Occidente, a partir del Siglo XV, de la obra de Ptolomeo fue posible gracias a la traducción árabe que se había conservado. Hacia el Siglo XII o XIII comenzaron a aparecer en Constantinopla las primeras traducciones griegas de la *Geografía* de Ptolomeo, que no se traduciría al latín hasta comienzos del Siglo XV.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ⁴ muestra un mapamundi del Siglo XII o XIII de Ptolomeo realizado según una proyección que en la actualidad clasificaríamos como cónica. A partir del Siglo XV aparecieron nuevos mapas (*tabulae novae*) basados en la obra de Ptolomeo en los que se añaden nuevos territorios.

La Figura 1. ³ muestra la versión que realizó Nicolò Germano de la *tabula nova* realizada por el geógrafo danés Clavus hacia 1424 y que apareció en Ulm en 1482.

En este mapa, realizado según el segundo tipo de proyección de Ptolomeo, se ha añadido la península de Escandinavia.

El retroceso cultural que se produjo en Europa durante la Edad Media supuso que la Tierra volviese a considerarse un disco flotando en el océano. Desaparece el sistema de localización por coordenadas geográficas (meridianos y paralelos).

La geografía matemática se sustituye por ciertas expresiones de la Biblia que inducen a pensar en una Tierra plana con Jerusalén en el centro.

Aparece un mapamundi circular o mapa de “T en O” que representa el mundo como un disco rodeado por un océano circular (la “O”) y dividido en tres partes en forma de “T” Figura 1. ⁴

^{5, 6, y 7} Imágenes tomadas de sitio web <http://www.midetumundo.org/sitemap.html>

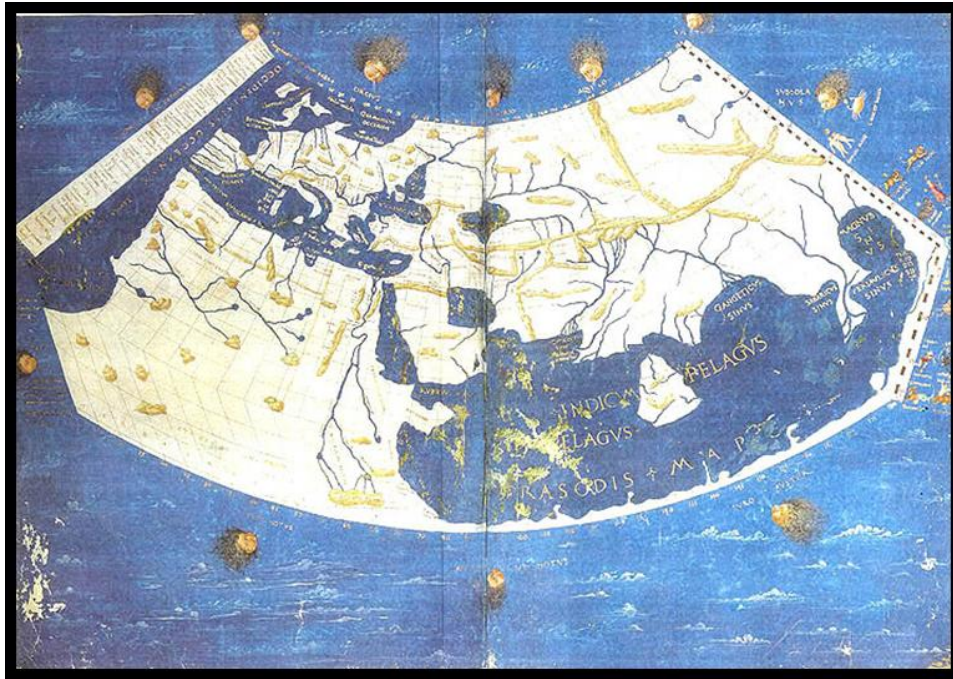


Figura 1. 2. Mapa de Ptolomeo (según la primera de sus proyecciones “pseudocónica”) en una edición del Siglo XV.

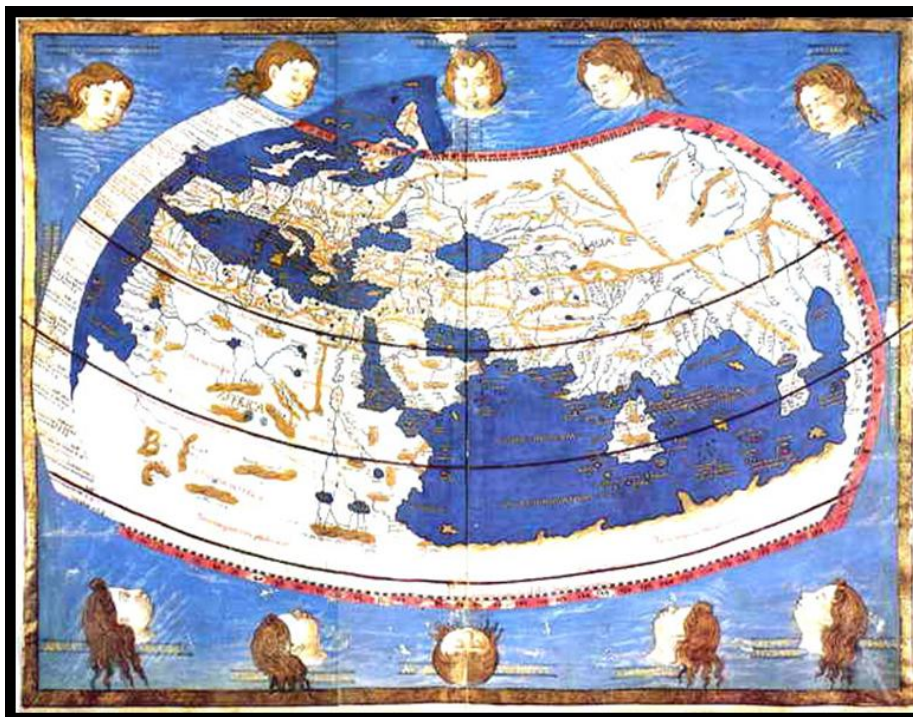


Figura 1. 3. Mapa Ptolomeico (según la segunda de sus proyecciones). Edición de Ulm de 1482

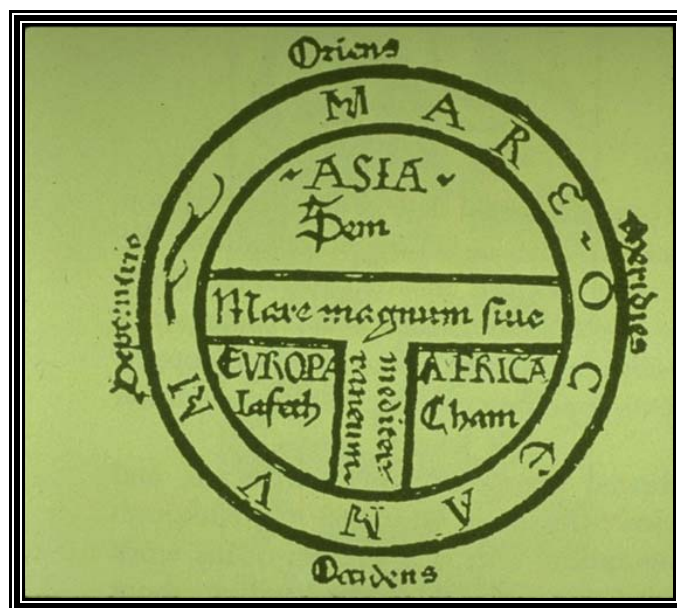


Figura 1. 4. Mapa medieval de “T en O” que aparece en la obra “Etimologías” de Isidoro de Sevilla (560-636).

Los mapas eclesiásticos medievales no tenían ninguna utilidad en la navegación. A partir de la introducción de la brújula en el Mediterráneo (Siglo XIII) aparecen las cartas portulanas o “portulanos” elaborados, en principio, por navegantes genoveses.

En estas cartas náuticas no se utilizaba un esquema de coordenadas, tan sólo detallaban los puertos, cabos y peligros para la navegación.

Aparecen las líneas de rumbo o rosa de los vientos junto con ciertas particularidades históricas o comerciales representadas mediante imágenes. Las dos grandes escuelas de trazado de portulanos fueron la italiana y la mallorquina. El primer portulano importante de ésta última escuela es el de Angelino Dulcert, realizado en Mallorca en 1339 que representa Europa y el litoral del norte de África (Figura 1. 5)⁷, Es el primer portulano conocido elaborado en Mallorca. Como en otros portulanos catalanes, la cadena montañosa Atlas se representa con forma de pata de gallo, los Alpes en forma de T y los montes de Bohême

La obra maestra de los mapas portulanos data aproximadamente de 1375 y fue realizado por el judío Mallorquín Abraham Cresques (Figura 1. 6)⁸, también se conoce habitualmente como “Atlas Catalán”.

^{8,9} Extraído de la web <http://www.comie.org.mx>



Figura 1. 5. Carta portulana elaborada por Angelino Dulcert, Mallorca 1339.

Entre 1405 y 1410 Jacobus Angelus tradujo al latín la *Geografía* de Ptolomeo que había sido conservada por los científicos árabes.

Así, se revitalizó el concepto de la esfericidad de la Tierra y se introdujo en los mapas la graduación por medio de coordenadas.

Durante la segunda mitad del Siglo XV los navegantes portugueses, españoles, franceses, ingleses e italianos revelan la existencia de nuevos territorios que irán incluyéndose en los mapas de la época.

Los cartógrafos fundamentales del Siglo XVI ya no son navegantes sino que han recibido formación matemática.

La proyección con más influencia en el desarrollo posterior de la cartografía fue la propuesta por Mercator en 1569 (Figura 1. 7)⁹, que había trabajado con el astrónomo y cartógrafo G. Frisius. Más abajo consideraremos en detalle esta proyección.

⁹ Web <http://www.hyparion.com/>



Figura 1. 6. Fragmento del mapa portulano realizado por Abraham Cresques en 1375.

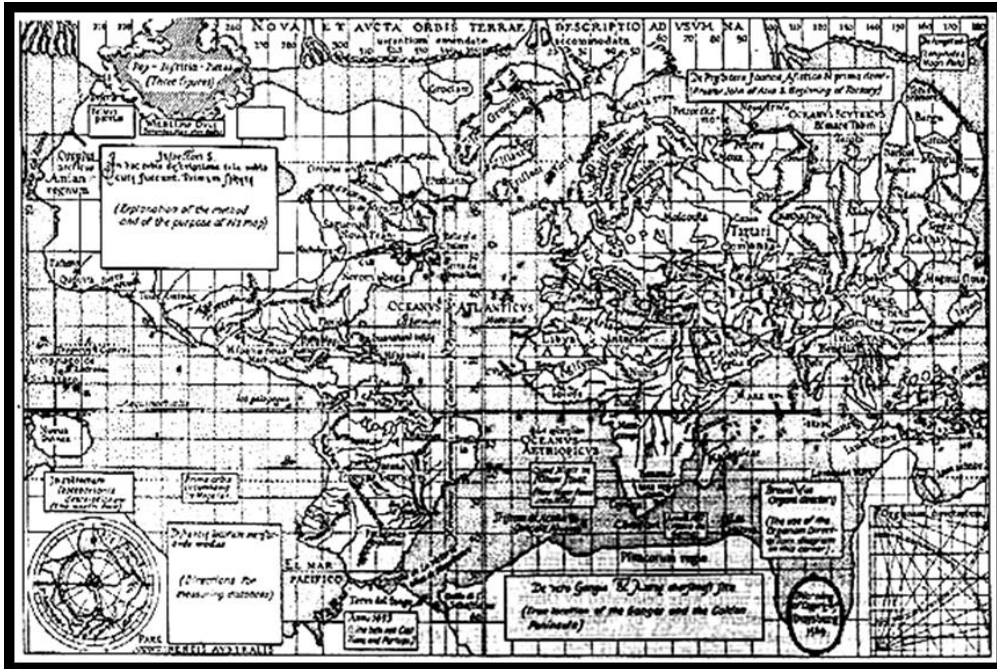


Figura 1. 7. Mapa de G. Mercator (1569) elaborado según la proyección que llevaría su nombre a partir de entonces.

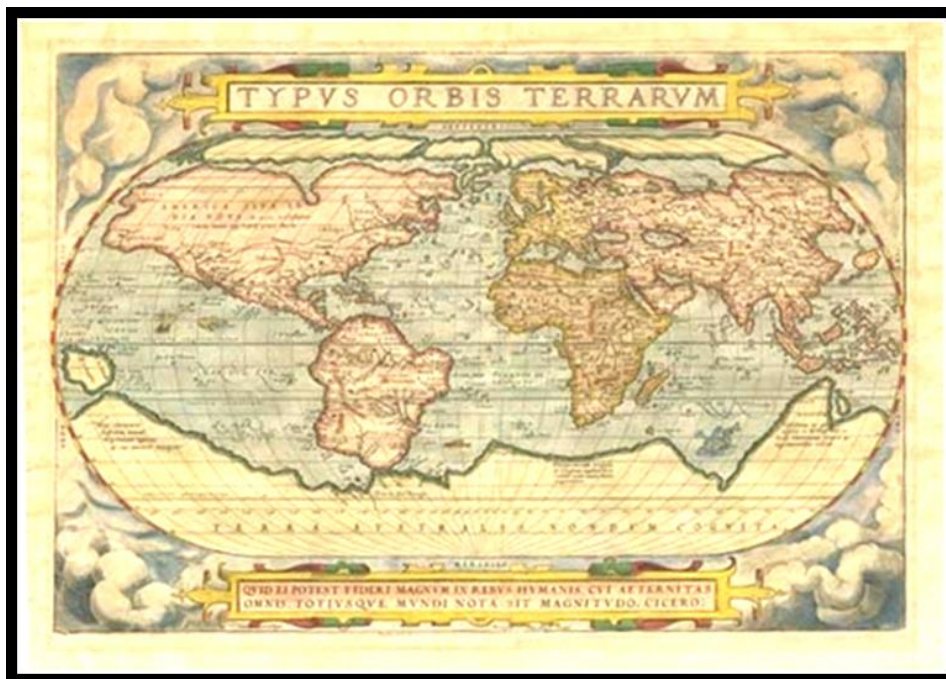


Figura 1. 8. Mapamundi (Typus orbis Terrarum) de A. Ortelius publicado en 1570 en la colección de mapas (Theatrum Orbis Terrarum).

A. Ortelius publica en 1570 una colección de mapas (*Theatrum Orbis Terrarum*) que se considera el primer atlas, es decir, la primera publicación que reúne una colección de mapas de tamaño manejable. Entre ellos figura el mapamundi que se muestra en la (Figura 1. 8)¹⁰, *Typus Orbis Terrarum*. En él utilizó una proyección oval¹¹ siendo el meridiano central 15°O. Los polos se representan como rectas cuya longitud es la mitad que la del ecuador.

Los paralelos son rectas horizontales equiespaciadas y los meridianos son arcos circulares equiespaciados en el ecuador. Los meridianos de longitud mayor de 90° con respecto al meridiano central se representan como semicírculos de igual radio; y, los meridianos de longitud menor de 90° con respecto al meridiano central, como arcos circulares que pasan por los extremos del meridiano central y son equidistantes en el ecuador.

A partir de Mercator y Ortelius Holanda se convirtió en un centro de publicaciones cartográficas de gran calidad pero que tenían un fin comercial y no científico.

Durante el Siglo XVII se produjo un gran desarrollo científico y técnico (por ejemplo, el proceso de triangulación desarrollado por G. Frisius y T. Brahe):

Hacia 1615 en Inglaterra e Italia se realizaron las primeras medidas por triangulación, en 1669 Jean Dominique Cassini y Jean Picard completaron el mapa topográfico de Francia.

Los trabajos cartográficos van a desarrollarse a partir de entonces en las academias de ciencia.

Los cartógrafos franceses del Siglo XVIII eran científicos que trabajaban para la Academia de Ciencias y cuya misión, por tanto, era mejorar desde un punto de vista científico los mapas existentes .

En 1720 Picard y Jacques Cassini completaron la medida del arco de meridiano entre Paris y Amiens. En 1735 una nueva expedición midió el arco de meridiano entre Perú y Laponia y confirmó las predicciones de Newton de que la tierra tiene forma esférica achatada por los polos. A partir de entonces se añadía una complicación más para proyectar la superficie terrestre sobre un plano.

¹⁰ <http://www.hyparion.com/>

¹¹ Este tipo de proyección fue raramente utilizada después de 1600 aunque algunas proyecciones modernas pseudocilíndricas son similares. Por ejemplo, la proyección Eckert III en la que los meridianos se representan como elipses.

1.3 COORDENADAS GEOGRÁFICAS.

1.3.1. RED DE MERIDIANOS Y PARALELOS DEL MAPA.

Eratóstenes (275-194 a.C) fue el primero en diseñar un sistema similar a los meridianos y paralelos que utilizamos en la actualidad.

Eratóstenes eligió el paralelo que pasa por Rhodas como origen de latitudes (con respecto al Ecuador su localización es 36° N) ya que esta línea dividía el mundo conocido en dos mitades iguales.

Hiparco (aprox. 150 a.C.) consideró que la retícula diseñada por Eratóstenes estaba determinada de forma arbitraria. Sugirió que esta retícula debía diseñarse según un criterio astronómico.

Ptolomeo (140 d.C) tomó el cero de latitudes en el ecuador y el cero de longitudes (cuya ubicación no sigue ningún criterio científico) en las llamadas Islas Afortunadas (Islas Canarias).

Para establecer la correspondencia adecuada entre grados de longitud y distancias es necesario conocer el radio de la Tierra. Ptolomeo no utilizó la estimación de Eratóstenes (que es bastante precisa) sino la que realizó Posidonius (100 d.C) que tiene bastante error. Por ello, la extensión en longitud del Mar Mediterráneo es de 62° y no de 42° como debería ser.

La latitud de un punto de la superficie terrestre es el ángulo formado por la normal a la superficie terrestre y el plano que pasa por el ecuador.

La longitud de un punto es el ángulo diedro formado por el plano que contiene el meridiano del punto dado y el meridiano que se toma como origen.

Las líneas de latitud constante se denominan paralelos. Los puntos de la misma longitud forman las líneas de longitud o meridianos.

La representación de los meridianos y paralelos en un mapa se denomina red de líneas de latitud y longitud del mapa. La forma de esta red dependerá de las ecuaciones matemáticas de la proyección utilizada. Precisamente, la primera característica del mapa que puede ayudarnos a identificar el tipo de proyección es el aspecto de la red de paralelos y meridianos: si los meridianos y paralelos se representan como rectas o no, si es una red ortogonal, simétrica, cómo se representan los polos, cuál es la separación de paralelos a lo largo del meridiano central y entre los meridianos a lo largo del ecuador o meridiano central.

1.3.2. EL PROBLEMA DE LA DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD EN LA NAVEGACIÓN.

Para poder elaborar un mapa es necesario conocer con precisión las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de los territorios que se representan.

El procedimiento para la determinación de la latitud no planteaba dificultades y era conocido por los griegos.

Se hacía a partir de la altitud del sol o a partir del ángulo entre el horizonte y la estrella polar. Sin embargo, para averiguar la longitud en el mar hay que saber qué hora es en el barco y en otro lugar de longitud conocida en ese mismo instante y convertir la diferencia horaria en separación geográfica.

Como la tierra gira 360° en 24 horas, cada hora de diferencia supondrá una diferencia en longitud de 15° . Además, esos 15° no corresponden a la misma distancia en el Ecuador que al norte o al sur de esta latitud.

Los primeros astrónomos medían diferencias de tiempo (es decir, diferencias de longitud geográfica) por medio de los eclipses de la luna.

Sin embargo, los eclipses no se producían con suficiente frecuencia como para convertirse en un sistema de determinación de longitudes en la navegación.

Otro método (propuesto en el Siglo XVI) se conocía como método de la distancia lunar. Se basa en que la luna recorre cada hora una distancia aproximadamente igual a su diámetro. Por la noche se puede estudiar su posición respecto a ciertas estrellas fijas. Además, durante la mitad de cada mes la luna es visible por el día y se puede observar si se acerca o se aleja del Sol.

Galileo propuso medir la longitud geográfica a partir las observaciones de las lunas de Júpiter. Elaboró tablas en las que predecía los eclipses de cada satélite y consideraba que sus movimientos eran absolutamente predecibles.

No obstante, el método que se acabaría imponiendo no requería la observación astronómica. Se trataba de fabricar un reloj que a bordo de un barco funcionara con suficiente exactitud como para medir diferencias horarias con precisión y convertirlas en diferencias de longitud respecto a un punto de longitud cero arbitrariamente elegido.

Objetivamente, el obstáculo fundamental para la aplicación de este método era de carácter técnico. Los relojes que existían a principios del Siglo XVIII no soportaban las diferencias de humedad y de temperatura en alta mar ni los movimientos del barco.

En 1730 John Harrison terminó de elaborar el H-1, un reloj que podía medir el tiempo con suficiente precisión a bordo de un barco. No obstante, H1 sería sucesivamente mejorado por H2, H3 y H4.

Hacia la década de 1780 los diarios de navegación empiezan a mostrar referencias diarias de cálculos de longitud por medio de relojes. En pruebas de comparación los cronómetros mostraban una precisión y una facilidad de uso mayores que las tablas de distancia lunar que se había convertido en el método rival de éste.

Hacia 1910 los gobiernos de Estados Unidos, Inglaterra y Francia tomaron la decisión de dejar de publicar las tablas de las distancias lunares que, desde la utilización generalizada del cronómetro, habían dejado de utilizarse para determinar la longitud.

Hacia 1940 se comenzaron a utilizar señales de radio para determinar la posición de los barcos (sistema LORAN¹², Long Range Navigation).

En la década de 1970 se introdujo el uso de satélites. Los primeros sistemas que utilizaban satélites para establecer la posición estaban basados en el efecto Doppler.

En la actualidad se utiliza el GPS (Global Positioning System)¹³. Antes de existir el sistema GPS se utilizaron otros sistemas de navegación y posicionamiento basados en la recepción de señales de radio, que aplicaban el principio matemático de la triangulación.

Durante la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron el radiogoniómetro, el radiofaro direccional, las radio balizas y el loran, todos ellos basados en la transmisión o recepción de ondas de radio. El radiogoniómetro fue el primero que se utilizó de forma generalizada como ayuda a la navegación.

¹² El sistema Loran utiliza estaciones situadas en puntos conocidos A, B y C que emiten una señal simultáneamente. Un barco registra el tiempo que pasa entre las señales recibidas de las estaciones A y B y determina su posición en una hipérbola que es la curva de diferencias de tiempo constante. Para determinar su posición exacta en dicha hipérbola necesita una tercera estación. Determina entonces una segunda hipérbola a partir de las señales de las estaciones B y C. El punto de intersección de ambas hipérbolas le permite determinar su posición exacta después de realizar algunas correcciones para tener en cuenta la forma de la tierra.

¹³ Estos sistemas podían determinar la posición de un barco o un avión sin necesidad de conocer la distancia que los separaba de otros puntos de referencia.

1.3.3. LÍNEAS DE RUMBO SOBRE LA ESFERA.

Una línea de rumbo o loxodroma (*loxos* = oblicuo, *dromo* = camino) es una curva que forma con cada meridiano un ángulo constante α . En navegación es muy utilizada porque corresponde a la trayectoria marcada por una posición constante en la brújula. Sobre el globo terrestre es una espiral que tiene el polo como punto asintótico ya que la distancia entre dos puntos de esta curva que están sobre el mismo meridiano disminuye a medida que la latitud aumenta desde el ecuador al polo (Figura 1. 9)¹⁴. Para determinar una línea de rumbo necesitamos conocer un punto por el que pasa y el ángulo α . Esta curva fue estudiada por Pedro Nunes (Nuñez) en 1535, matemático admirado por Mercator. Precisamente, un globo terrestre fabricado por Mercator unos años después, en 1541, fue el primero que mostraba líneas de rumbo. El estudio de esta curva fue fundamental para demostrar que sobre un mapa en el que la red de paralelos y meridianos es cuadrada la representación de un línea de rumbo constante no es una recta.

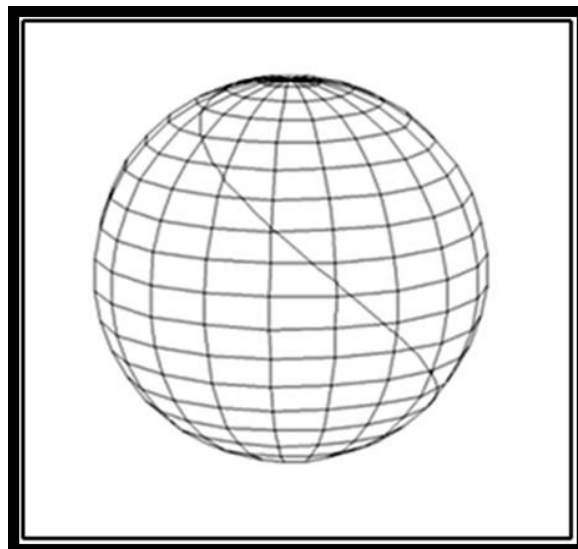


Figura 1. 9. Representación de una línea de rumbo (o loxodromo) sobre una esfera

Consideramos sobre una esfera (de radio 1) los puntos $A(\phi, \theta)$ y $B(\phi + d\phi, \theta + d\theta)$ que pertenecen a una línea de rumbo que forma un ángulo α con los meridianos. Un segmento infinitesimal de paralelo dl_p puede expresarse como:

$$dl_p = d\theta \cdot \tan \alpha$$

$$dl_p = \cos \theta \cdot d\theta$$

¹⁴ <http://www.hyparion.com>

por tanto, combinando esas dos expresiones obtenemos la ecuación diferencial de la línea de rumbo en coordenadas esféricas:

$$\frac{d\theta}{\cos\theta} = \frac{1}{\tan\alpha} d\phi$$

Como es una ecuación diferencial de variables separables, integrando a ambos lados

$$\int \sec\theta d\theta = \frac{1}{\tan\alpha} \int d\theta \rightarrow \tan\alpha \cdot \ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4}\right)\right) + C \quad (I)$$

La función $\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4}\right)\right)$ puede expresarse también como:

$$\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4}\right)\right) = \operatorname{arcsenh}(\tan\theta) = \operatorname{arctanh}(\operatorname{sen}\theta) = \operatorname{arccosh}(\operatorname{sec}\theta) \quad (II)$$

Entonces, tomando $C = 0$ en (I) podemos escribir:

$$\phi = \tan\theta \cdot \operatorname{arctanh}(\operatorname{sen}\theta) \rightarrow \operatorname{sen}\theta = \tanh\left(\phi \frac{\square}{\tan\alpha}\right) \quad (III)$$

$$\phi = \tan\theta \cdot \operatorname{arctanh}(\operatorname{sec}\theta) \rightarrow \operatorname{cos}\theta = \frac{1}{\operatorname{cosh}\left(\phi \frac{\square}{\tan\alpha}\right)} \quad (IV)$$

A partir de las expresiones (III) y (IV) podemos obtener la ecuación del loxodromo en paramétricas ("fx(φ), fy(φ), fz(φ)")

$$f_x(\phi) = \frac{\operatorname{cos}\phi}{\operatorname{cosh}\left(\phi \frac{\square}{\tan\alpha}\right)} \quad f_y(\phi) = \frac{\operatorname{sen}\phi}{\operatorname{cosh}\left(\phi \frac{\square}{\tan\alpha}\right)} \quad f_z(\phi) = \tanh\left(\phi \frac{\square}{\tan\alpha}\right)$$

Para obtener el valor del ángulo α que forma la línea de rumbo que une los puntos $A_1(\theta_1, \theta_1)$ y $A_2(\theta_2, \theta_2)$ con los meridianos integramos la ecuación diferencial entre A_1 y A_2 .

$$\tan\alpha = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln\left(\tan\left(\frac{\theta_2}{2} + \frac{\pi}{4}\right)\right) - \ln\left(\tan\left(\frac{\theta_1}{2} + \frac{\pi}{4}\right)\right)} \quad (VI)$$

La distancia recorrida entre esos dos puntos al seguir la línea de rumbo está dada por:

$$|A_1 A_2|_{l.\text{rumbo}} = \frac{R}{\operatorname{cos}\alpha} |\theta_2 - \theta_1|$$

Donde R es el radio terrestre (que en las expresiones anteriores habíamos considerado igual a 1).

1.3.2 GEODÉSICAS SOBRE LA ESFERA.

La curva más corta que conecta dos puntos en un espacio es una geodésica. El camino más corto entre dos puntos sobre una esfera es un arco de circunferencia máxima, que es la intersección entre la esfera y un plano que pasa por el centro de la esfera. Un triángulo geodésico (Figura 1. 10) es un triángulo en el que los tres vértices están conectados por geodésicas. Un triángulo esférico es un triángulo geodésico sobre la superficie de una esfera. Sea ΔABC un triángulo esférico con lado a opuesto al vértice A , lado b opuesto al vértice B y lado c opuesto al vértice C sobre una esfera con centro en O . Este triángulo ΔABC tiene seis ángulos: tres ángulos de arco a, b, c y tres ángulos de vértice A, B, C .

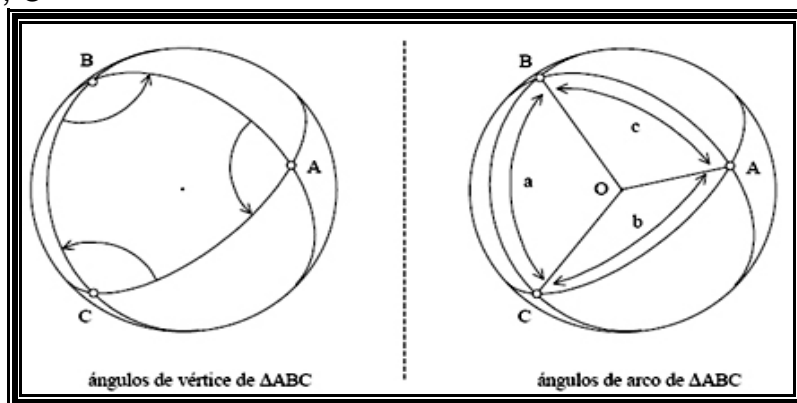


Figura 1. 10. Triángulo geodésico en geometría esférica.¹⁵

se calcula la longitud del camino más corto entre dos puntos de la superficie esférica (camino ortodrómico). En geometría esférica se cumple la siguiente relación (ley de cosenos para los Lados).

$$\cos b = \cos a \cos c + \operatorname{sen} a \operatorname{sen} c \cos B$$

En la (Figura 1. 10) Suponemos que B es el polo de la esfera. Los ángulos a, c y A se relacionan con la latitud y longitud de los puntos A y C de la siguiente forma:

$$a = \frac{\pi}{2} - \lambda_c \quad c = \frac{\pi}{2} - \lambda_A \quad B = \phi_c - \phi_A$$

Por tanto,

$$\cos b = [\operatorname{sen} \lambda]_c [\operatorname{sen} \lambda]_A + [\cos \lambda]_c [\cos \lambda]_A \cos [(\phi_c - \phi_A)]$$

Entonces, la distancia entre A y C Siguiendo la trayectoria geodésica está dada por

$$\operatorname{sen} \lambda_c \operatorname{sen} \lambda_A + \cos \lambda_c \cos \lambda_A \cos [(\phi_c - \phi_A)]$$

¹⁵ <http://www.hyparion.com>

1.4. TIPOS DE PROYECCIÓN.

Las localizaciones geográficas se emplean, habitualmente, para la localización de proyectos, centroides de parcelas, mallas de muestreo, empleadas en proyectos dentro del ámbito de la ingeniería.

En la actualidad, debido al famoso fenómeno de la “globalización”, unido al empleo cada vez en mayor medida de los sistemas de posicionamiento global, **GPS**, es necesario conocer los parámetros que emplean estos sistemas, para no llevarnos desagradables sorpresas con los resultados de las mediciones efectuadas en campo, sobre todo al superponerlo con cartografía digital, o la existente editada por las instituciones.

El desarrollo de esta proyección U.T.M. se efectúa, no porque sea la mejor, sino porque es la empleada en la cartografía Mundial.

No es la mejor proyección, ya que presenta una serie de problemas sobre todo a la hora de trabajar con ella, en especial cuando se cambia de Huso, etc. Hay que recordar que si México adopto este sistema es porque no le quedo más remedio que adoptarlo.

Una vez acercada la forma terrestre y su representación combinándola con el Geoide y Elipsoide, se define el **DATUM**, considerándolo desde el punto de vista que define un origen y situación de un sistema de coordenadas valido para una determinada zona de la tierra, no extrapolable a toda la superficie terrestre.

1.4.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE UN PUNTO.

Básicamente la localización geográfica de un punto se puede realizar detallando uno de estos dos parámetros:

- 🌐 Coordenadas geográficas en formato Longitud-Latitud.
- 🌐 Coordenadas (x, y) U.T.M. Universal Transversa Mercator.

Cada uno de estas dos formas de localizar un punto sobre la superficie terrestre debe de cumplir los Sigüientes requisitos:

- 🌐 Que el punto sea único
- 🌐 Que quede perfectamente identificado el sistema de proyección empleado al localizar el punto.
- 🌐 Que permita referenciar la coordenada “z” del punto.

1.4.2 LA PROYECCIÓN U.T.M.

La representación cartográfica del globo terrestre, ya sea considerado esté como una esfera o una elipsoide, supone un problema, ya que no existe modo alguno de representar toda la superficie desarrollada sin deformarla e incluso de llegar a representarla fielmente, ya que la superficie de una esfera no es desarrollable en su conversión a un soporte papel (a una representación plana Figura 1. 11)¹⁶.

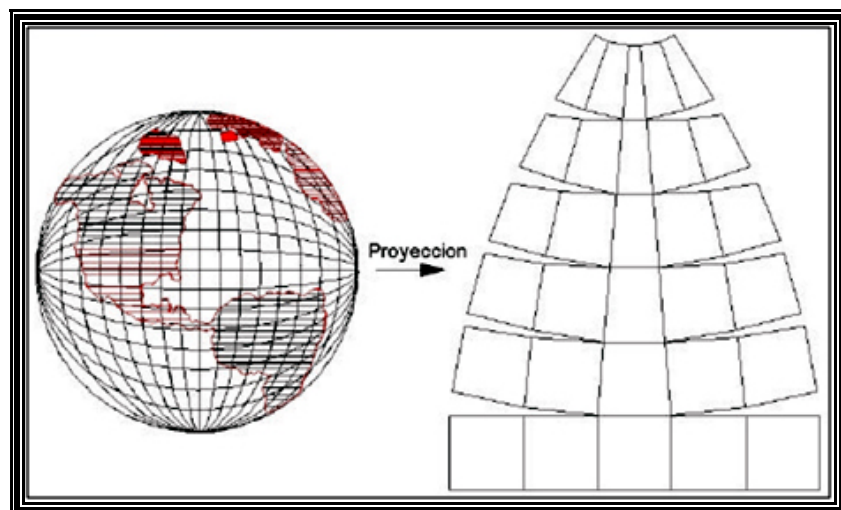


Figura 1. 11. Representación plana de la tierra.¹⁷

Las proyecciones estudian las distintas formas de desarrollar la superficie terrestre minimizando, en la medida de lo posible (Figura 1. 11), las deformaciones sufridas al representar la superficie terrestre.

En todos los casos conservan o minimizan los errores, dependiendo de la magnitud física que se desea conservar; su superficie, las distancias, los ángulos, etc., teniendo en cuenta que únicamente se podrá conservar una de las magnitudes anteriormente descritas y no todas a la vez: Aunque la mejor forma de representar el planeta Tierra es el globo terráqueo, este no se puede transportar con facilidad, es imposible reproducirlo con detalle y, además, su esfericidad impide observar toda la Tierra a la vez.

Dada la imposibilidad de utilizar el globo terráqueo de una forma más útil, ya desde la antigüedad se intentó representar la Tierra en una superficie plana. Los mapas son representaciones planas de la esfera terrestre y los cartógrafos, o especialistas en cartografía, son los encargados de elaborarlos.

^{15,16} Web http://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_UTM

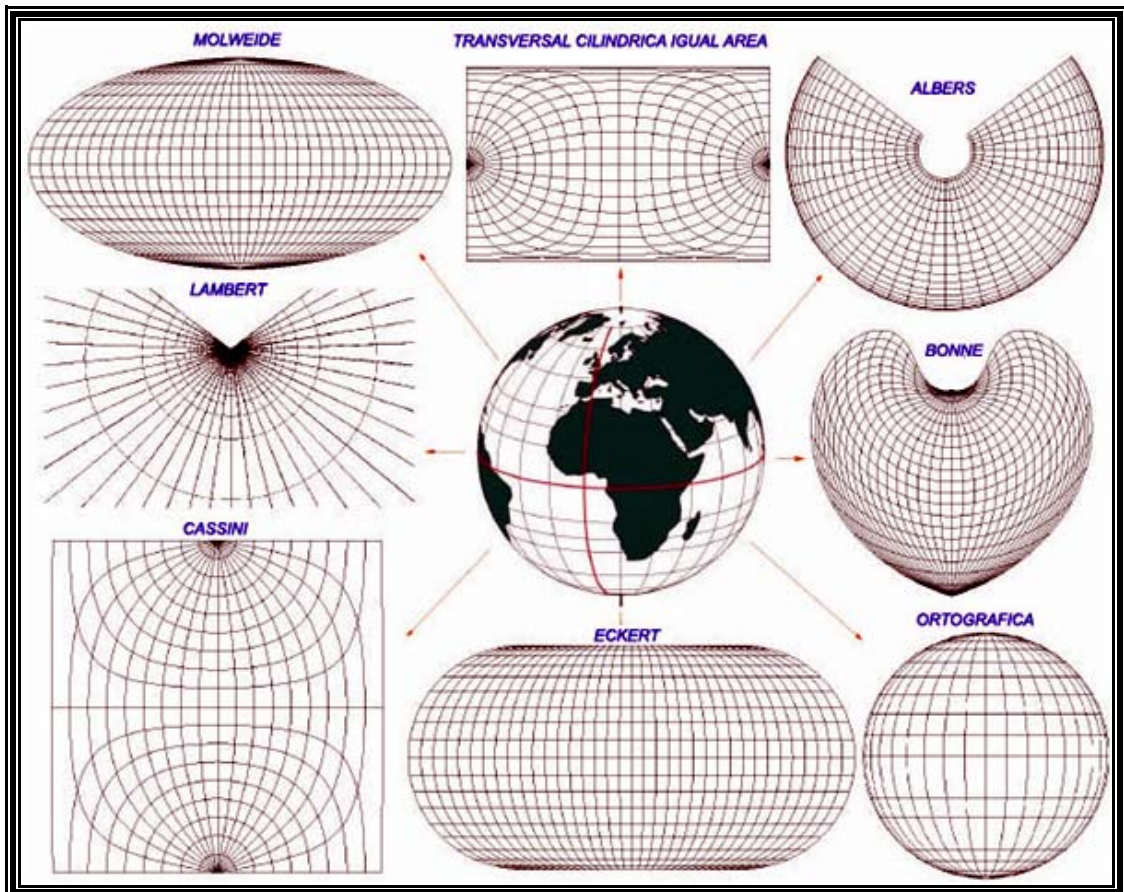


Figura 1. 12. Proyecciones cartográficas.

1.4.2.1. PROYECCIONES PLANAS.

Cuando la superficie a representar es pequeña y por lo tanto la esfericidad terrestre no va a influir en la representación cartográfica, por ejemplo en pequeños levantamientos topográficos, se recurre a su representación de forma plana, de forma que todos los puntos representados están vistos desde su perpendicular:

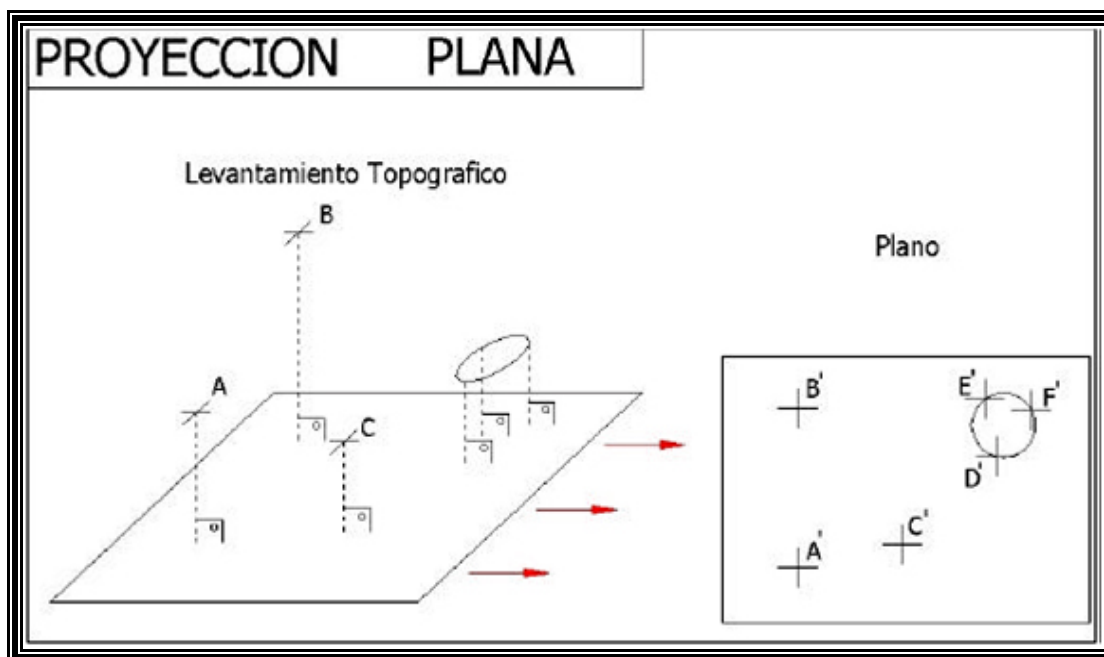


Figura 1. 13. Proyección Plana.

A la representación cartográfica obtenida, ya sea en soporte papel o en soporte magnético, se le denomina “plano” (Figura 1. 13)¹⁸. Esta representación de la superficie, generalmente en el sistema de planos acotados, está dentro del campo de la Topografía, la Agrimensura, etc.

La Proyección Plana o Acimutal, Se construye el mapa imaginando o situando un plano tangente o secante a un punto de la superficie de la Tierra. Son las más indicadas para representar superficies reducidas o cuando interesa que la información gravite en torno a un punto central.

¹⁸ Web

http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_field_guide/B_proyecciones_cartograficas.pdf

1.4.2.2. PROYECCIONES GEODÉSICAS.

Las proyecciones geodésicas son proyecciones en las que la esfericidad terrestre tiene repercusión importante sobre la representación de posiciones geográficas, sus superficies, sus ángulos y sus distancias.

El sistema U.T.M. es un sistema de proyección geodésica ideado en 1569 por Gerhard Kremer, denominado Mercator al latinizar su apellido.

Es un sistema en el cual se construye geoméricamente el mapa de manera que los meridianos y paralelos se transformen en una red regular, rectangular, de manera que se conserven los ángulos originales.

Este tipo de transformación se la denomina **conforme**. Dentro de las transformaciones posibles existen fundamentalmente tres tipos en función de la variable que conservan una vez proyectados:

- 🌐 **M Proyecciones Conformes:** aquellas en las que los ángulos se conservan, con una relación de semejanza de un valor de “1” en el centro de la proyección hasta un valor máximo de “1+ Φ ” en los límites del campo de proyección.
Esta alteración “ Φ ” es proporcional al cuadrado de las distancias que une el centro de la proyección con el punto a proyectar. Esta variación en los ángulos se subsana multiplicando todas las escalas por un factor de “1-(2/ Φ)”. Otro ejemplo de proyección conforme es la proyección Lambert.
- 🌐 **Proyecciones Equivalentes:** son aquellas en las que la superficie se conserva después de la proyección. Como ejemplo de las Proyecciones equivalentes esta la proyección Bonne, Sinusoidal y la Goode.
- 🌐 **Proyecciones Afilácticas:** son aquellas en las que no se conservan ni los ángulos ni las distancias. Un ejemplo de este tipo de proyecciones es la “UPS”, “universal polar stereographics”, que como su nombre indica es la más usada en latitudes polares.

Una proyección no puede ser a la vez equivalente y conforme, ni a la inversa.

En cartografía se emplean sobre todo las Conformes, ya que interesa la magnitud angular sobre la superficial.

1.5. LA PROYECCIÓN MERCATOR TRANSVERSAL.

La Proyección U.T.M. conserva, por lo tanto, los ángulos pero distorsiona todas las superficies sobre objetos originales así como las distancias existentes.

La proyección U.T.M. se emplea habitualmente dada gran importancia militar, y sobre todo, debido a que el Servicio de Defensa de Estados Unidos lo estandariza para su empleo mundial en la década de 1940.

Otra de las formas de clasificar a las proyecciones en función de la figura geométrica empleada al proyectar. La proyección U.T.M. está dentro de las llamadas proyecciones cilíndricas, por emplear un cilindro situado en una determinada posición espacial para proyectar las situaciones geográficas.

El sistema de proyección U.T.M. toma como base la proyección MERCATOR (Figura 1. 14) Este es un sistema que emplea un cilindro situado de forma tangente al elipsoide en el ecuador:

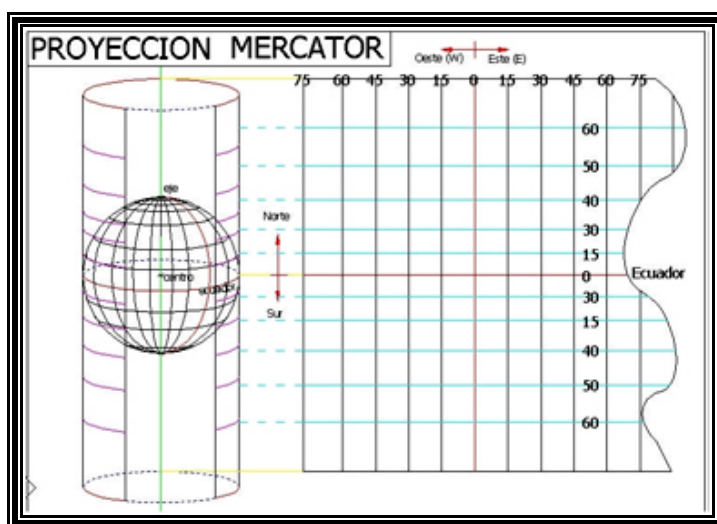


Figura 1. 14. Proyección Mercator.¹⁹

La red creada hace que tanto meridianos como paralelos formen una cuadrícula oblicua, "grid" o rejilla, de manera que una recta oblicua situada entre dos paralelos forma un ángulo constante con los meridianos.

Como ejemplo de esta proyección se muestra el desarrollo de todo el globo terráqueo en la proyección Mercator:

¹⁹ Web

http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_field_guide/B_proyecciones_cartograficas.pdf

La *proyección TRANSVERSAL MERCATOR (U.T.M.)*, toma como base la proyección Mercator, sin embargo la posición del cilindro de proyección es transversal respecto del eje de la tierra:

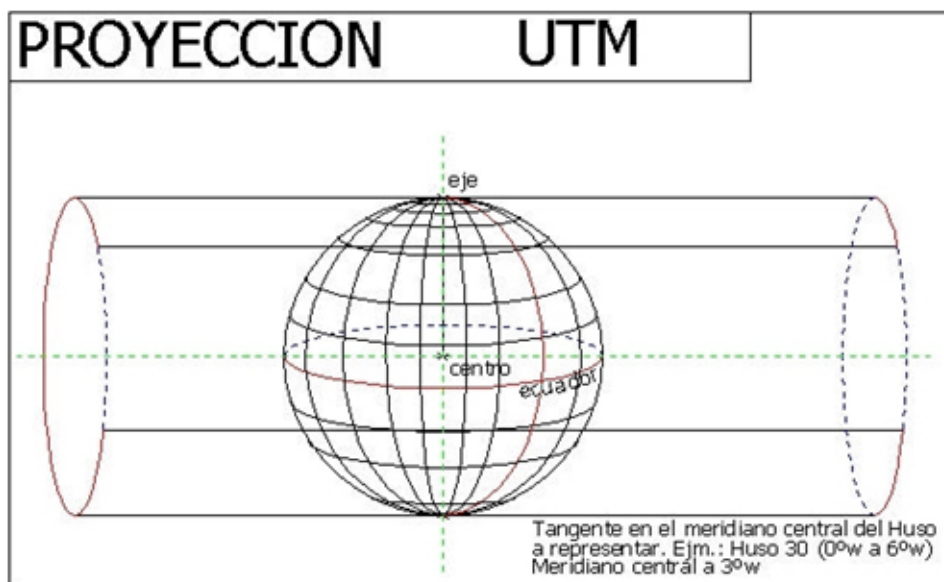


Figura 1. 15. Proyección Universal Transversal Mercator²⁰

Se define un huso como las posiciones geográficas que ocupan todos los puntos comprendidos entre dos meridianos. Cada huso puede contener 3°, 6° u 8°. El Sistema U.T.M. emplea Husos de 6° de Longitud.

La proyección U.T.M. genera husos comprendidos entre meridianos de 6° de Longitud, generándose en cada huso un meridiano central equidistante 3° de longitud de los extremos de cada huso.

Los husos se generan a partir del meridiano = de Greenwich, 0° a 6° E y W, 6° a 12° E y W, 12 a 18° E y W, Esta red creada, ("grid"), se forma huso a huso, mediante el empleo de un cilindro distinto para generar cada uno de los husos, siendo cada uno de los cilindros empleados tangente al meridiano central de cada huso, cuya longitud es de 3°, o múltiplo de esta cantidad con 6° de separación.

Esta situación del cilindro de proyección, tangente al meridiano central del huso proyectado, hace que únicamente una línea se considerada como auto medica, la del meridiano central. Sobre esta línea, el modulo de deformación lineal K es la unidad (1), creciendo linealmente conforme se aumenta la distancia a este meridiano central.

²⁰ Web

http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_field_guide/B_proyecciones_cartograficas.pdf

Esta relación entre las distancias reales y las proyectadas presenta un mínimo de 1 y un máximo de 1.01003, (distorsión lineal desde 0 a 1.003%) (Figura 1. 17).

Para evitar que la distorsión de las magnitudes lineales aumente conforme se aumenta la distancia al meridiano central se aplica a la un factor K_c a las distancias $K_c=0.9996$, de modo que la posición del cilindro de proyección sea secante al elipsoide, creándose dos líneas en las que el modulo de anamorfosis lineal sea la unidad.

La transformación geométrica creada con la proyección hace que únicamente dos líneas se consideren “**rectas**”, (en la misma dirección de los meridianos y paralelos); el meridiano central del huso y el paralelo 0° (ecuador), en los que ambos coinciden con el meridiano geográfico y el paralelo principal, (ecuador).

El meridiano central, por lo tanto, se encuentra orientado en la dirección del Norte Geográfico, y el paralelo 0° se encuentra orientado en rumbo 90° - 180° , dirección Este (e) y Oeste (w).

El factor de escala aumenta en mayor magnitud conforme aumenta la distancia al meridiano central (Figura 1. 16)

Según la normas que define el INEGI para el Sistema Geodésico Nacional, se adopta el conceptualizado por la Asociación Internacional de Geodesia a través del Sistema Geodésico de Referencia (GRS80), y éste deberá estar referido al Marco de referencia terrestre Internacional (ITRF) definido por el servicio Internacional de rotación de la Tierra (IERS) para el año 2000, con datos de la época 2004.0 denominado ITRF00 época 2004.0 asociado al GRS80, el cual es el marco de referencia oficial para México

La UTM es una proyección cilíndrica que en su desarrollo, genera 60 zonas sucesivas para cubrir la totalidad del globo terrestre. Cada zona es de 6 grados de longitud por 80 grados de latitud al norte y al sur.

La numeración de las zonas ocurre del 1 al 60 a partir del meridiano 180 grados hacia el Este, en particular a México le corresponden las zonas 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16, incluida la zona económica exclusiva.

Por convención, cada una de las zonas se divide en fajas transversales de 4 grados de latitud, (en la zona en donde se encuentra México, un grado equivale aproximadamente a 110 km) las cuales son identificadas para la primer faja a partir del ecuador, a México le corresponden las fajas D, E, F, G, H e I.

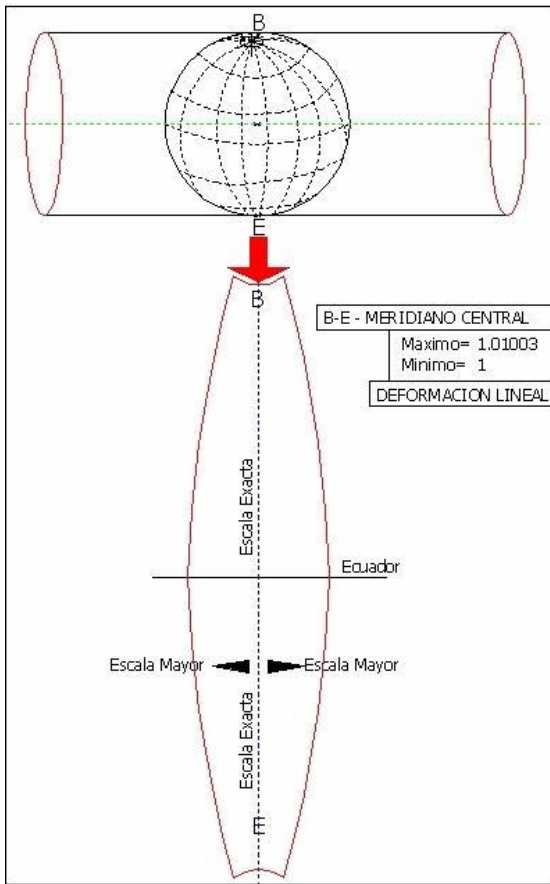


Figura 1. 16. Relación entre las distancias reales y las proyectadas

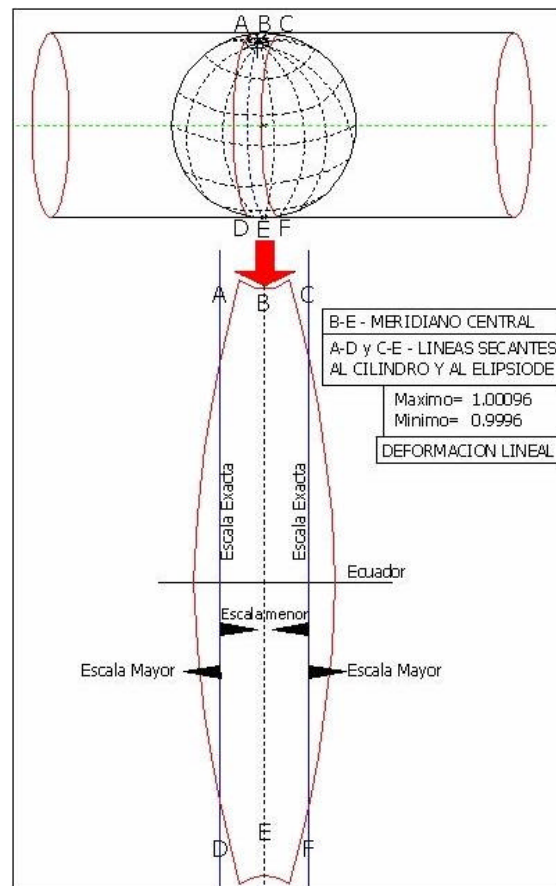


Figura 1. 17. Transformación geométrica

1.5.1. LÍNEAS LOXODRÓMICAS Y ORTODRÓMICAS.

Curiosamente un barco que navegue Siguiendo este rumbo constante, fácil de conservar en la navegación marina, describirá una recta llamada **Loxodrómica**, la cual no será el camino más cortó entre los dos puntos a recorrer. A la línea de menor recorrido entre los dos puntos se la denomina **Ortodrómica** (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)²¹.

Esta diferencia entre el recorrido Loxodrómico y el recorrido Ortodrómico es más acusado en zonas próximas a los polos, por encima de los 80° de Latitud, por lo que en estas zonas se recurre a otro tipo de proyecciones para su empleo en las cartas marinas.

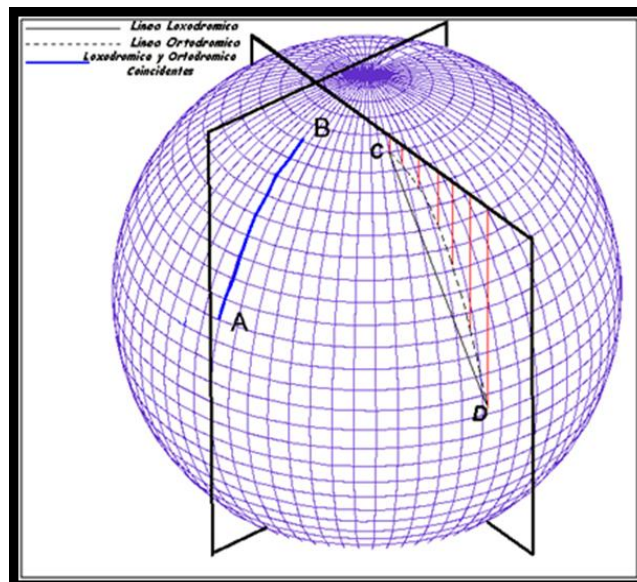


Figura 1. 18. Líneas Loxodrómicas y Ortodrómicas vista sobre el globo terráqueo

Visto sobre el globo terráqueo la línea ortodrómica y loxodrómica son coincidentes en el recorrido A-B, ya que se encuentra la línea sobre un meridiano central de un huso, y ambas líneas, por el hecho de encontrarse sobre el meridiano central, la proyección U.T.M (Figura 1. 19)²⁰ la transforma en una línea recta, lateral de la rejilla creada. La Línea C-D presenta una ortodrómica que es el mínimo recorrido entre ambos puntos, y una loxodrómica en la que se conserva el acimut para unir ambos puntos.

²¹http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_field_guide/B_proyecciones_cartograficas.pdf

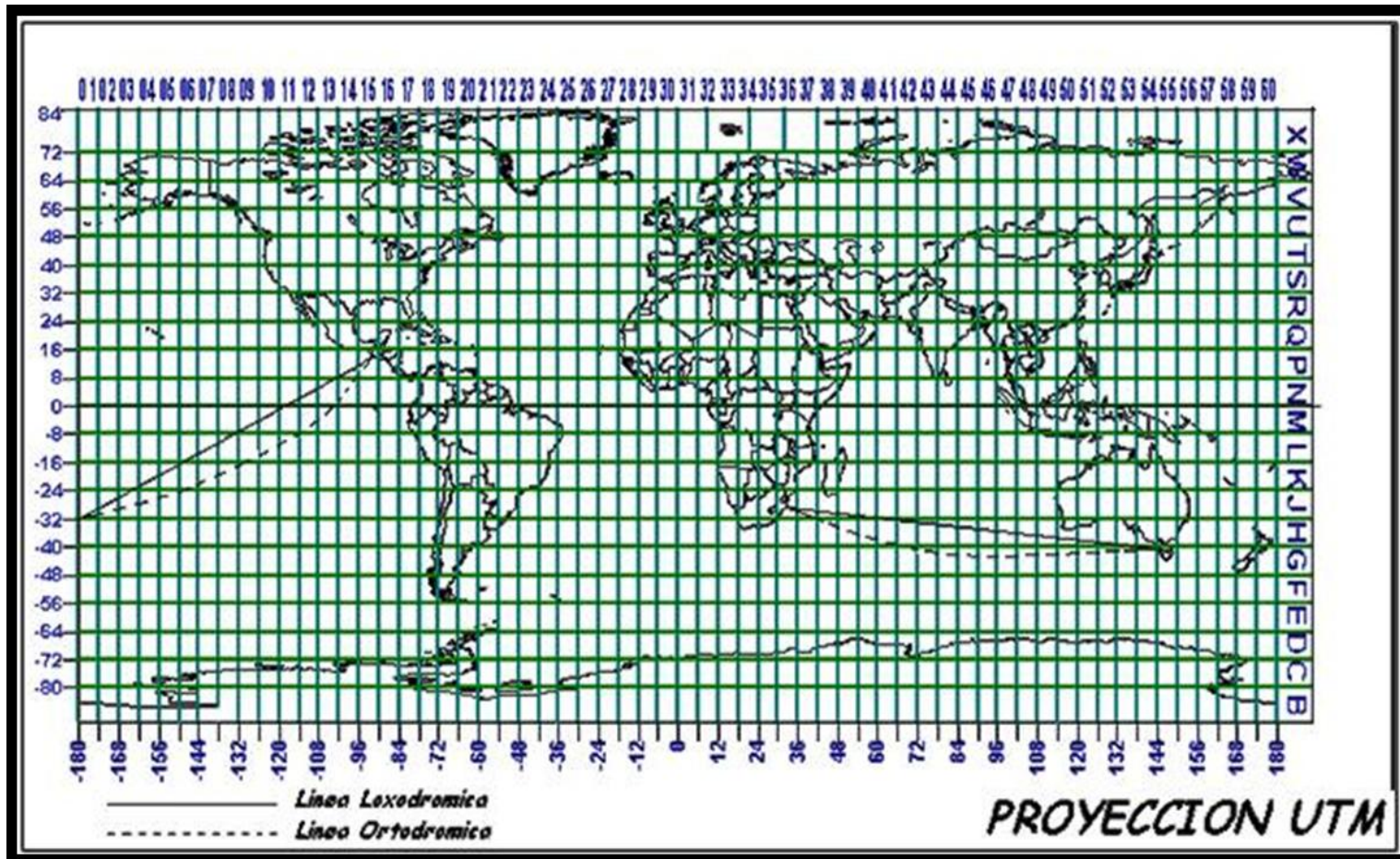


Figura 1. 19. Líneas Loxodrómicas y Ortodrómicas.

La medición de las distancias es por tanto distinta en función de la latitud donde se encuentre, por ello se adicionan a las cartas de navegación una escala gráfica, que será utilizada dependiendo de la latitud se le atribuirá una escala distinta del tipo:

O bien se especifica la escala del mapa para refiriéndose a la escala existente en un determinado paralelo.

No siendo extrapolable esta escala a la totalidad del mapa.

1.5.2 VENTAJAS DEL SISTEMA U.T.M.

El sistema de Proyección U.T.M. tiene las Siguietes ventajas frente a otros sistemas de proyección:

- ④ Conserva los ángulos.
- ④ No distorsiona las superficies en grandes magnitudes, (por debajo de los 80ª de Latitud).
- ④ Es un sistema que designa un punto o zona de manera concreta y fácil de localizar.
- ④ Es un sistema empleado en todo el mundo, empleo universal, fundamentalmente por su uso militar.

El sistema U.T.M es un sistema comúnmente utilizado entre los 0º y los 84º de latitud norte y los 80º de latitud sur, por lo que es un sistema estandarizado de empleo en el Mundo.

No se emplea a partir de los 80º de latitud ya que produce una distorsión mas acusada cuanto mayor es la distancia al ecuador, como ocurre en los polos, por ello se emplea, tanto en el hemisferio Norte como en el hemisferio Sur por estas latitudes.

Para la cartografía de zonas existentes en los polos se emplea normalmente el sistema de coordenadas UPS (Universal Polar Stereographic);

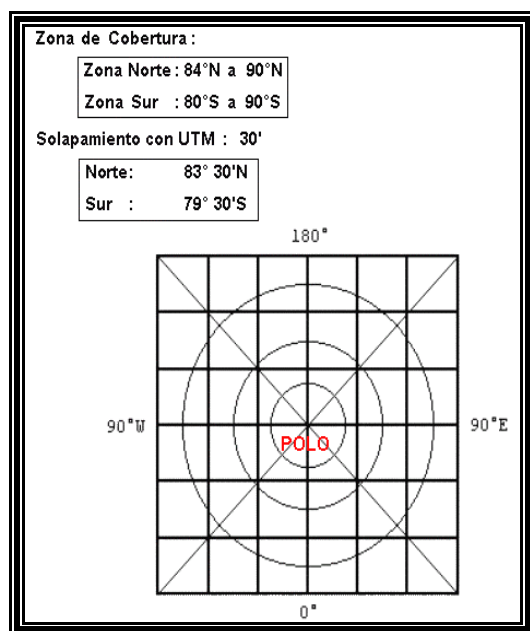


Figura 1. 20. Cobertura UPS

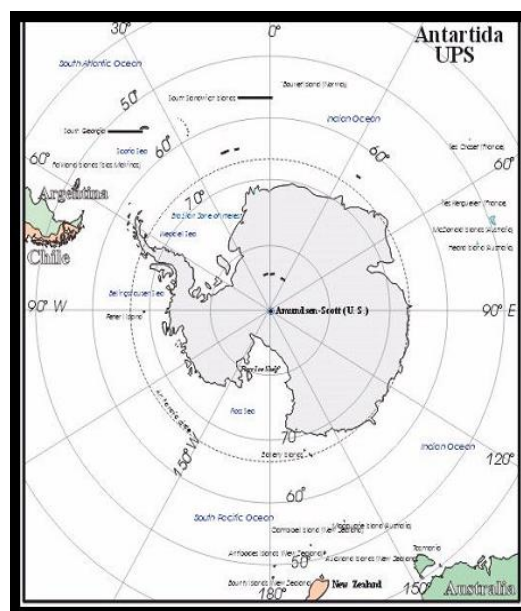


Figura 1. 21. Proyección UPS

Este sistema de representación plana se denomina PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA POLAR, en el que el vértice de proyección se encuentra situado en cada uno de los polos Figura 1. 21 y 1.21²².

Esta proyección que se obtiene proyectando el globo sobre un plano mediante un foco situado en el polo opuesto del punto de contacto del globo con el plano de proyección. Tanto los meridianos como los paralelos son círculos.

La deformación aumenta simétricamente hacia el exterior a partir del punto central. Tiene una sola propiedad: todos los círculos en el globo aparecen como círculos en la proyección.

La transformación efectuada convierte los paralelos en circunferencias concéntricas con centro en el polo y los meridianos en rectas concurrentes; el haz de rectas que pasa por el polo.

²² De la web <http://www.hyparion.com/web/diccionario/dics/cartografia/proyeccion.htm>

CAPÍTULO 2.

LA FOTOGRAMETRÍA.

2.1. INTRODUCCIÓN.

La fotogrametría es una disciplina que crea modelos en 3D a partir de imágenes 2D, para de esta manera obtener características geométricas de los objetos que representan, mediante el uso de relaciones matemáticas establecidas en la geometría proyectiva, y de la visión estereoscópica que posee en forma natural el ser humano. Ya que las imágenes de los objetos son obtenidas por medios fotográficos, la medición se realiza a distancia, sin que exista contacto físico con el objeto.

Desde sus inicios, la fotogrametría se ha convertido en la herramienta indispensable en la producción de la base cartográfica de todos los países del mundo; de hecho, la mayoría de la cartografía topográfica de nuestro planeta ha sido realizada por medio de esta disciplina.

Si bien la fotogrametría tuvo su inicio en el levantamiento de fachadas arquitectónicas y plantas de edificios, mediante el uso de fotografías terrestres, pronto se utilizaron las fotografías aéreas para el levantamiento de la cartografía de base, lo que le dio el tremendo auge que ha mantenido hasta nuestros días. Esta capacidad de cartografiado de base la convierte también en la fuente primigenia de información para la cartografía temática y para los sistemas de información geográfica.

Como consecuencia de la utilización de la fotografía aérea, se desprendió de la fotogrametría la disciplina de la fotointerpretación, la cual comparte sus fundamentos básicos con la fotogrametría aérea.

A partir de los años ochenta, el desarrollo acelerado de la computación, condujo al establecimiento de la teledetección como consecuencia lógica de la evolución de la fotointerpretación, así como al desarrollo de técnicas de tratamiento computarizado de imágenes digitales y al desarrollo de la visión por computadora.

Actualmente, con el apoyo de la computación, la fotogrametría se ha convertido en una disciplina indispensable en el campo de la cartografía, a la vez que aumenta el número de sus usuarios debido a que los equipos fotogramétricos de elevado costo, están siendo desplazados por programas de precio menor, o por programas desarrollados por los mismos usuarios.

2.1.1 DEFINICIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA.

Fotogrametría: es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado.

Esta definición es en esencia, la adoptada por la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS).

Por otra parte, la sociedad americana de fotogrametría y sensores remotos (ASPRS), tiene la Siguiete definición, ligeramente mas completa que la anterior:

Fotogrametría: es el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información confiable de objetos físicos y su entorno, mediante el proceso de exponer, medir e interpretar tanto imágenes fotográficas como otras, obtenidas de diversos patrones de energía electromagnética y otros fenómenos.

Etimológicamente, la palabra fotogrametría se deriva de las palabras griegas photos, que Significa luz; gramma, que Significa lo que está dibujado o escrito, y metrón, que Significa medir. Usando en conjunto esas palabras fotogrametría Significa medir gráficamente por medio de la luz.

2.2 FUNDAMENTOS DE LA FOTOGRAMETRÍA.

El principio en el que se basa la fotogrametría consiste en proyectar en forma ortogonal sobre un plano de referencia, la imagen registrada en una fotografía, la cual ha sido proyectada sobre el negativo mediante la proyección central, que es la usada por las lentes.

En fotogrametría se asume que la proyección central es perfecta, lo cual implica que:

- ④ No existe desviación de los rayos de luz que atraviesan los lentes de la cámara.
- ④ La imagen se proyecta sobre una superficie perfectamente plana.
- ④ La relación matemática que relaciona el objeto y su imagen se conoce con el nombre de principio de colinealidad.

2.3 ETAPAS DE LA FOTOGRAMETRÍA.

El paso de la proyección central a la proyección ortogonal se puede realizar bien sea por la fotogrametría gráfica, prácticamente en desuso en nuestros días, o por la **estereofotogrametría**, la cual es usada actualmente en la inmensa mayoría de los trabajos fotogramétricos.

La fotogrametría gráfica, usando los principios de la geometría proyectiva, marcó el inicio de esta disciplina, ya que para la época era la única forma en que se podían restituir las fotografías.

Esta modalidad se basa en la intersección de líneas que parten de dos estaciones diferentes, es decir de los puntos en que se tomaron las fotografías, hacia un punto común.

Actualmente, gracias a la capacidad de cálculo que ofrecen las computadoras, el uso de esta forma de restitución se ha convertido, para algunos casos especiales, en una alternativa que puede competir con la estereofotogrametría.

La estereofotogrametría se basa en la visión estereoscópica para recrear en la mente del observador un modelo estereoscópico a partir de un par de fotografías, tomadas cada una de ellas desde una posición diferente, para ser observadas en forma separada por el ojo respectivo.

De esta manera, cada ojo transmite al cerebro una imagen ligeramente diferente del otro, tal como lo hacen al observar los objetos tridimensionales.

El cerebro interpretará entonces esas diferencias como diferencias en la profundidad, y formará un modelo estereoscópico en la mente del observador.

Si se introduce un punto artificial sobre cada fotografía, mediante el aparato de observación, de manera que la posición relativa entre los mismos pueda variar, la sensación de profundidad para el punto también variará.

La posibilidad de colocar un punto cuya altura sobre el modelo puede ser modificada, así como la posición sobre el mismo, permite establecer un nexo entre el modelo que el observador recrea y las coordenadas registradas por el aparato de observación, que definen la posición del punto.

Si se establece un vínculo entre la marca flotante y un aparato trazador, el recorrido que la marca flotante realiza sobre el modelo será dibujado, teniendo entonces como resultado un plano del modelo.

La aplicación del uso de la marca flotante (Figura 2. 1) encuentra su expresión en los llamados aparatos restituidores, los cuales son los que realizan los mapas y planos fotogramétricos.

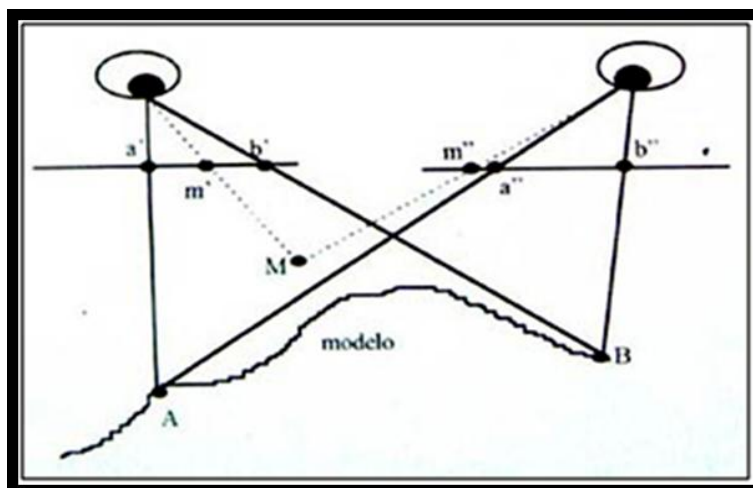


Figura 2. 1. Visión Estereoscópica y Marca Medidora en un Restituidor Mecánico

La estereofotogrametría se ha llevado a cabo por las siguientes técnicas:

La fotogrametría analógica, que surge en la década de los treinta basada en aparatos de restitución y es la responsable de la realización de la mayoría de la cartografía mundial. En ella, un par de fotografías es colocado en un aparato restituidor de tipo óptico o mecánico (Figura 2. 2²³ y Figura 2. 3).

El operador realiza en forma manual la orientación interior y exterior para crear el modelo estereoscópico, debidamente escalado y nivelado.

El levantamiento de la información planimétrica y altimétrica del modelo se realiza también en forma manual, mediante el seguimiento con la marca flotante posada sobre los detalles de la superficie del modelo.

Esta información es ploteada en una cartulina colocada sobre la mesa trazadora, relacionada con el modelo por medios mecánicos o eléctricos.

La fotogrametría analítica, que aparece en 1957 como un desarrollo natural de la interrelación entre los aparatos restituidores analógicos y el surgimiento de la computación. En ella, la toma de información es analógica y el modelado geométrico es matemático. Mediante el uso de un monocomparador o de un estereocomparador integrado en el restituidor, se miden las coordenadas X, Y de los puntos pertinentes de las fotografías, coordenadas que son procesadas por los programas de la computadora del sistema.

²³ Fuente [http:// www.ufv.br/ufvnugeo2002](http://www.ufv.br/ufvnugeo2002)

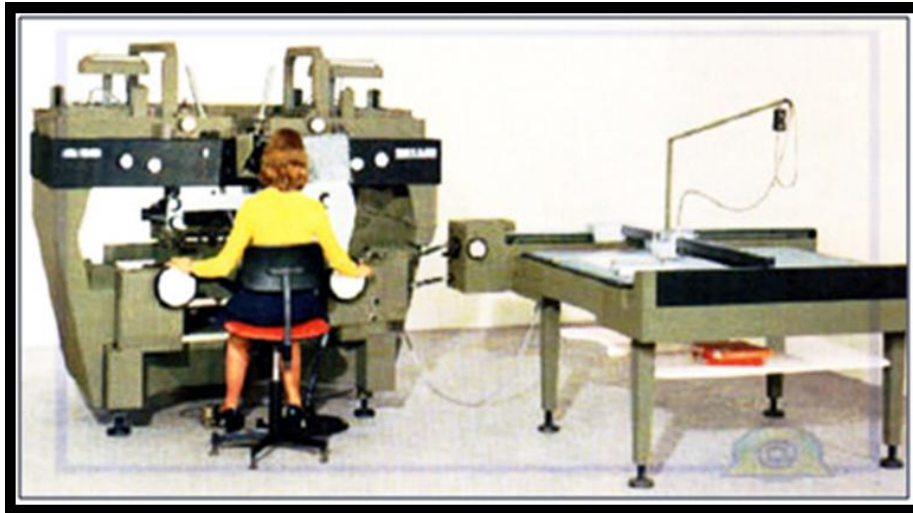


Figura 2. 2. Restitución Análoga

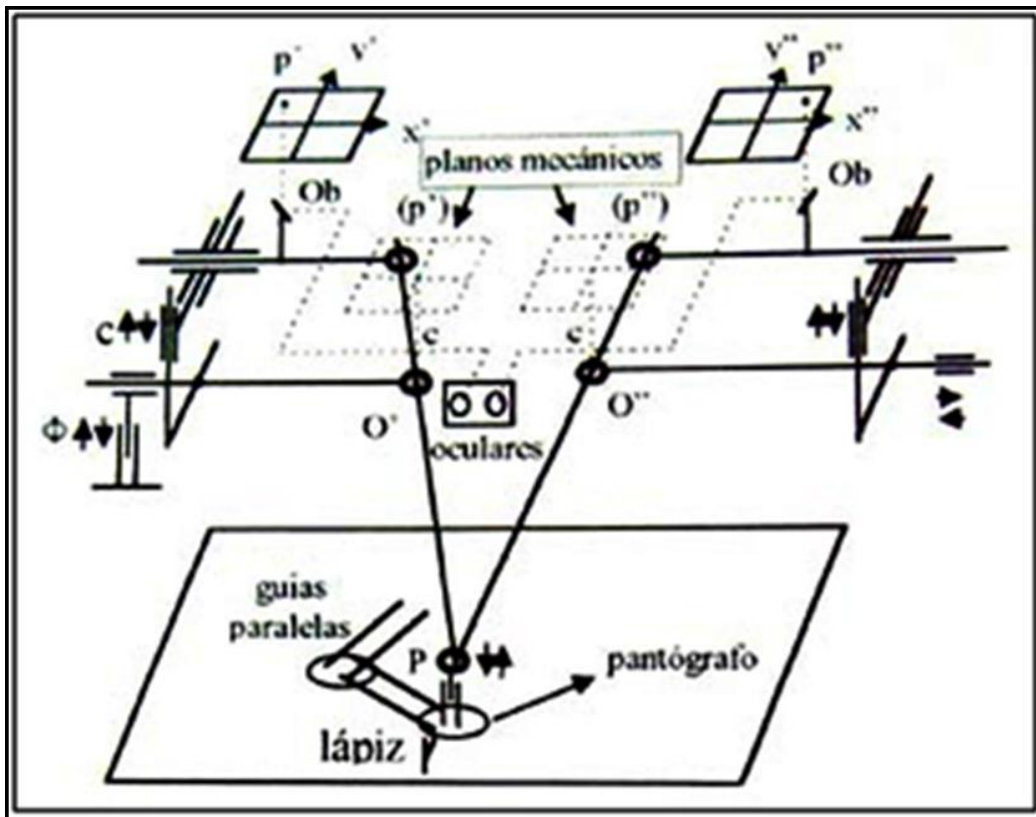


Figura 2. 3. Restituidor Mecánico (preparado en base a 6)

Este realiza el procesamiento de la orientación interior y exterior en forma analítica y procesa el levantamiento de la información del modelo que realiza el operador, para llevarla a su correcta posición ortogonal, y finalmente almacenarla en una base de datos tipo CAD. (Figura 2. 4)



Figura 2. 4. Restituidor Analítico zeiss p3.²⁴

La fotogrametría digital, actualmente en auge, surge como consecuencia del gran desarrollo de la computación, que permitió realizar todos los procesos fotogramétricos mediante el uso de computadoras.

Con la fotogrametría digital crecen las posibilidades de explotación de las imágenes, a la vez que se simplifican las tecnologías, permitiendo con ello la generación automática de modelos de elevación del terreno, orto imágenes y estereortoimágenes, generación y visualización de modelos tridimensionales etc.

Para llevar a cabo la restitución digital, las imágenes digitales son ingresadas en la computadora, y mediante visualización en pantalla de las mismas, el operador ingresa los puntos necesarios para realizar el proceso de orientación en forma matemática.

²⁴ Fuente <http://www.dammaps.com/Equipment.htm>

La restitución puede ser un proceso iterativo con el operador o ser realizada en forma automática por correlación de imágenes.

La salida en la fotogrametría digital puede ser en formato raster o formato vectorial o en ambos formatos (Figura 2. 5)²⁵.

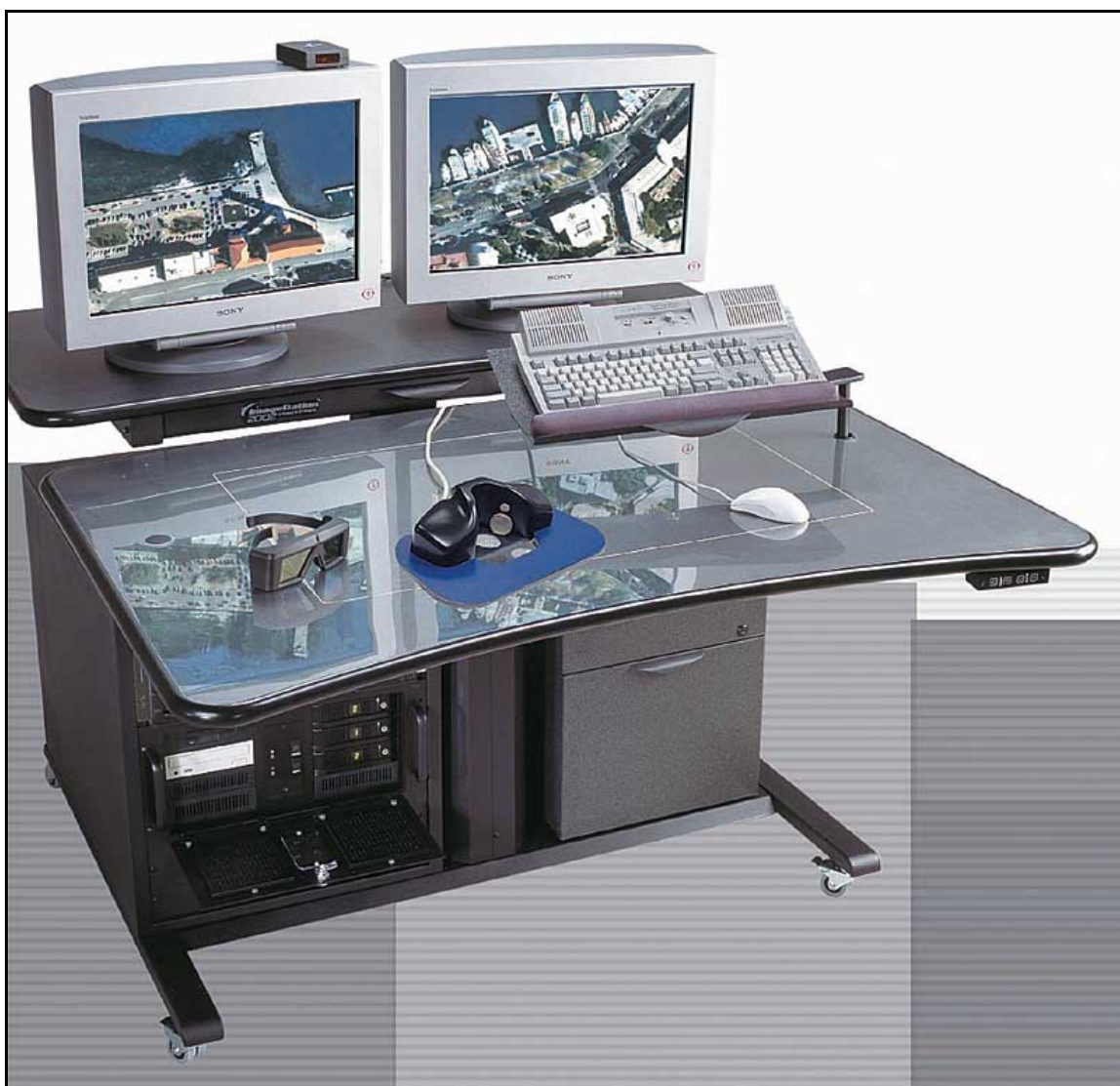


Figura 2. 5. Restitución Digital, softplotter.

²⁵ <http://www.dammaps.com/Equipment.htm>

2.4 RECUENTO HISTÓRICO.

La fotogrametría es una disciplina resultado de la convergencia de la óptica, la fotografía, las matemáticas (especialmente la geometría proyectiva), para realizar levantamientos de carácter cartográfico principalmente.

Por ello podemos iniciar sus raíces en la óptica, la primera de estas ciencias que tuvo un desarrollo práctico y cuyo aporte es fundamental, tanto en la captura de imágenes, como en su posterior reconstrucción, y cuyo desarrollo teórico y práctico permitió la popularización, por parte de los pintores, de la cámara oscura, la cual constituye la base de la cámara fotográfica. De hecho, en el Siglo XVIII había alcanzado tal popularidad, que eran fabricadas casi en serie, adaptadas a los usos y circunstancias. Así pues, cuando aparecieron las primeras emulsiones fotográficas, ya contaban con un aparato relativamente perfeccionado donde podían ser colocadas para captar la luz.

Paralelamente, los métodos matemáticos para realizar el levantamiento de objetos utilizando perspectivas, también habían sido desarrollados para el momento de la aparición de la fotografía, por lo que la utilización de la misma para el trazado de planos, fue inmediatamente puesto en práctica, con resultados satisfactorios. La utilidad comprobada de la fotografía, para trabajos topográficos, estimuló el desarrollo de técnicas conducentes a mejorar las aplicaciones de la fotogrametría, la cual rápidamente se desplazó hacia una nueva plataforma de toma:

Las aeronaves.

El surgimiento de la aeronáutica, con el advenimiento de los aeróstatos, es contemporáneo con el de la fotografía por lo que la ventaja de la perspectiva aérea fue notada y aplicada de inmediato.

La primera guerra mundial puso en manos de los fotogrametristas abundantes recursos económicos que permitieron consolidar la fotogrametría aérea.

También en esa guerra apareció una disciplina colateral a la fotogrametría, con un inmenso campo de aplicación: la fotointerpretación.

El desarrollo de las técnicas fotogramétricas continuó en forma progresiva, hasta que el desarrollo de las computadoras y de la fotografía digital, iniciado a partir de los años 70, le dio un nuevo y poderoso impulso a esta disciplina, arribando de esta manera al estado actual de la fotogrametría, una poderosa tecnología con un alto grado de sofisticación. En forma paralela al progreso de las técnicas fotogramétricas, se desarrollaron las astronáuticas, permitiendo el acceso de la fotogrametría espacial, mediante sensores instalados a bordo de satélites. De esta manera, la Luna y Marte ya han sido mapeados mediante imágenes tomadas por estos satélites, y actualmente parte de los productos fotogramétricos provienen de imágenes tomadas desde el espacio.

2.5 APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA.

La primera utilización de la fotogrametría consistió en la realización de mapas y planos topográficos. De hecho, los mapas base de la cartografía de cualquier país, son obtenidos mediante ella. Actualmente, además de la realización de estos mapas base, se realizan muchos otros tipos de mapas de carácter especial, los cuales pueden presentar gran variedad de escalas, y se utilizan en el proyecto y diseño de obras tales como autopistas, carreteras, vías de ferrocarril, puentes, tuberías, oleoductos, gasoductos, líneas de transmisión, presas hidroeléctricas, estudios urbanos, etc.

Además de estos mapas, orientados principalmente al desarrollo de obras de ingeniería.

Civil, podemos mencionar mapas realizados para uso catastral, mapas geológicos, mapas de suelos, mapas forestales, etc.

Dentro de las disciplinas que se benefician de la fotogrametría no topográfica podemos mencionar a la arquitectura, en el levantamiento de monumentos y de sitios; la arqueología, en aplicaciones similares a las usadas en arquitectura; la bioestereometría, en el estudio de formas de seres vivos; la construcción naval, la automotriz y la de maquinaria pesada hacen también uso de esta disciplina.

Una importante cantidad de la información cartográfica producida mediante el empleo de la fotogrametría, es utilizada como referencia espacial en bases de datos digitales.

Estos, se integran con otros datos obtenidos por diferentes medios, generalmente de carácter cualitativo y descriptivo para conformar sistemas de información geográfica (S.I.G). Las fotografías aéreas verticales con apoyo de la fotogrametría permiten determinar una gran cantidad de información referente a grandes extensiones de terrenos, distancias horizontales y verticales en los mismos, pendientes entre otros, de ahí deriva la gran importancia de la fotogrametría como ciencia desarrollada para obtener medidas reales a partir de fotografías, tanto terrestres como aéreas, para realizar mapas topográficos, mediciones y otras aplicaciones geográficas. Muchos mapas topográficos se realizan gracias a la fotogrametría aérea; Se requieren cámaras adecuadas y equipos de trazado de mapas muy precisos para representar la verdadera posición de los elementos naturales y humanos, y para mostrar las alturas exactas de todos los puntos del área que abarcará el mapa. El reconocimiento aéreo se ha hecho valioso en grado sumo para el levantamiento de mapas, la agricultura, los estudios del medio ambiente y las operaciones militares. Mediante el uso de imágenes aéreas, los científicos pueden analizar los efectos de la erosión del suelo, observar el crecimiento de los bosques, gestionar cosechas o ayudar a la planificación del crecimiento de las ciudades.

2.6. VENTAJA DE LA FOTOGRAMETRÍA.

La fotogrametría es una disciplina basada en la reconstrucción 3D de la realidad a partir de imágenes bidimensionales; es por ello que sus ventajas y desventajas están estrechamente ligadas a las formas de registro (generalmente fotografías aéreas), y a los métodos y equipos de restitución.

- ④ Reducción de costos. Está relacionado con el tamaño del área a restituir. A partir de las 200 hectáreas de superficie, el método fotogramétrico se torna competitivo frente al método topográfico, aumentando esta competitividad a medida que el área se hace más extensa.
- ④ Reducción del trabajo de campo. El trabajo de campo es un componente oneroso de todo trabajo topográfico, cuyo costo aumenta con la accesibilidad y las condiciones de clima adverso. La reducida cantidad de puntos de control necesarios en la fotogrametría, reduce la estadía en el campo.
- ④ Velocidad de compilación. El tiempo requerido para realizar un mapa fotogramétrico es mínimo comparado con el que requiere el levantamiento topográfico y su posterior trabajo de gabinete.
- ④ Dado el poco tiempo necesario para el levantamiento fotogramétrico con el que se obtiene una reproducción fiel del terreno, en un periodo determinado, nos facilita datos muy valiosos en los casos de cambios súbitos, como por ejemplo: durante o después de catástrofes naturales.
- ④ Flexibilidad. El método fotogramétrico puede ser realizado en un variado rango de escalas, dependiendo de la escala de las fotografías y del tipo de aparato compilador utilizado, dependiendo también de la disponibilidad de recursos económicos y técnicos. Por ello, suministrar mapas o sustitutos con diferentes tiempos de producción, costos y precisión.
- ④ Registro multitemporal. Es muy útil para verificar mapas fotogramétricos. Las fotos aéreas proveen un registro preciso del las características del terreno en la fecha en que fueron tomadas, lo cual permite realizar comparaciones entre fotos de otras fechas para evaluar cambios en el terreno. Las fotos aéreas también pueden ser empleadas para otros usos diferentes al del proyecto original, ya que además de información métrica, las fotografías aéreas proporcionan información de carácter cuantitativo y cualitativo.

- ④ La Fotogrametría se puede aplicar en regiones donde no pueden utilizarse los métodos clásicos, como, por ejemplo: en regiones intransitables, tales como: ciénagas, desiertos, selvas vírgenes, territorios azotados por alguna epidemia u ocupados por fuerzas enemigas, etc., debido a la característica intrínseca de la fotogrametría, de que los objetos pueden ser medidos sin necesidad de estar cerca de ellos.
- ④ La aerofotogrametría aporta además una serie de ventajas, tales como, la fotografía en si, la cual es un documento que permite efectuar cualquier control en un momento dado. También se pueden obtener de ella datos jurídicos, geológicos, históricos y geogénicos de suma importancia.

2.7. DESVENTAJAS DE LA FOTOGRAMETRÍA.

- ④ Visión de la superficie del terreno cuando existe densa cobertura vegetal. En este caso es imposible ubicar la marca flotante sobre el terreno, por lo que se debe presumir una altura promedio de la vegetación con respecto al suelo. Sin embargo, como la cubierta vegetal tiende a suavizar los accidentes topográficos del terreno, siempre existirán errores en la ubicación de las curvas de nivel, aunque se pueda verificar la cota en los claros que existan en la vegetación.
- ④ Ubicación de curvas de nivel sobre superficies planas. El determinar la trayectoria de una curva de nivel en un terreno plano tiene un alto grado de dificultad, debido a la imprecisión en la colocación de la marca flotante. En consecuencia, se colocan puntos acotados en la restitución o se complementa con trabajo de campo.
- ④ El lugar debe ser inspeccionado para determinar aquellos elementos que no son visibles en forma satisfactoria, o que no cuya naturaleza exacta no puede ser determinada en el estereomodelo.
- ④ Siempre es necesario realizar un control de campo.
- ④ La aplicación de la fotogrametría requiere una inversión considerable de equipo y de personal especializado, por lo que su costo es elevado. Para realizar nuevos levantamientos se requiere la obtención de nuevas fotografías.

2.8. DIVISIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA.

A lo largo de la existencia de esta disciplina, se fueron desarrollando métodos que se adaptaban en forma óptima a los campos de aplicación en los que se les requería. Esto trajo a su vez como consecuencia, la creación de equipos específicos capaces de llevar a cabo la realización de estas técnicas especializadas. Agrupando estas técnicas y equipos en torno a sus campos de aplicación, se obtienen tres grandes grupos dentro de la fotogrametría.



Figura 2. 6. Fotografía Aérea

2.8.1. FOTOGRAMETRÍA AÉREA.

Es aquella que utiliza fotografías tomadas desde una cámara aerotransportada. Este hecho implica que su eje óptico casi siempre es vertical, y que su posición en el espacio no está determinada. (Figura 2. 6)²⁶

Generalmente, las cámaras usadas son de formato 23 × 23 cm, ya que son las más apropiadas para los trabajos cartográficos a los cuales está destinada. Actualmente cobra importancia la fotografía aérea de pequeño formato, debido a sus ventajas de accesibilidad económica. Otra modalidad que gana importancia la constituye la fotogrametría espacial, que utiliza imágenes estereoscópicas tomadas desde satélites de observación de la tierra.

²⁶ <http://images.google.com.mx/imgres>

2.8.2 FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE.

Es aquella que utiliza fotografías tomadas sobre un soporte terrestre; debido a esto, la posición y los elementos de orientación externa de la cámara son conocidos de antemano.

Si bien fue la primera aplicación práctica de la fotogrametría, actualmente se usa principalmente en labores de apoyo a la arquitectura, arqueología, ingeniería estructural y en levantamientos topográficos de terrenos muy escarpados.

Algunos autores ubican a los usos de la fotogrametría en arquitectura y arqueología en la división de objetos cercanos; sin embargo, cuando los objetos a levantar se vinculan con su posición sobre el terreno, se realiza una actividad de carácter topográfico; por ello, pueden ser ubicadas en esta división.

La fotogrametría arquitectónica, usa los principios de la fotogrametría terrestre desarrollados en la mencionada etapa de la Metrofotografía; al respecto cabe destacar el trabajo realizado por el arquitecto alemán Meydenbauer en 1858, que aplica el método gráfico de intersección de rayos homólogos punto a punto al levantamiento de planos de iglesias y monumentos históricos, y, en 1885, con la creación del Instituto de Fotogrametría Arquitectónica, comienza la creación de un archivo de monumentos históricos en Alemania.

Respecto a los productos que se obtienen en fotogrametría arquitectónica el más común es el dibujo de líneas, aunque también se generan otros como fotografías rectificadas, ortofotografías o modelos digitales.

El dibujo de líneas a escalas 1:20 o 1:50 que muestre los detalles arquitectónicos del edificio sigue siendo el más solicitado, ya que resultan esenciales para determinados profesionales como son los arquitectos y arqueólogos, sin embargo éste se trata de un producto interpretado, razón por la cual cada vez se demandan más otro tipo de productos, como las fotografías rectificadas, o las ortofotografías en el caso de fachadas con variaciones de profundidad notables.

Como prueba de ello citar el trabajo desarrollado por Frank A. van den Heuvel de generación de un modelo VRML a partir de una fotografía rectificada del mencionado archivo de Meydenbauer.

2.9 PRODUCTOS DE LA FOTOGRAMETRÍA.

La fotogrametría genera productos finales, gráficos, fotográficos y/o digitales, en función de la aplicación que tendrán los mismos. Discriminando estos productos según el proceso y su forma final, se pueden agrupar según los tipos que se describen brevemente a continuación.

2.9.1 MAPA DE LÍNEAS.

Es el producto por excelencia de la fotogrametría. Actualmente existen dos modalidades de medios de presentación de los mapas: los tradicionales, los cuales son ploteados sobre una mesa de dibujo por el aparato restituidor, y los numéricos los cuales son realizados mediante una interface que conecta los movimientos del aparato restituidor para que puedan ser realizados mediante un programa CAD (Computer Assisted Design).

En estos programas, los elementos que conforman la información que se extrae del modelo, se registran mediante puntos, líneas y polígonos, en diferentes capas según su contenido temático. Esta información puede editarse y completarse una vez hecha la restitución, por lo que se obtiene un plano digital del terreno, que por su naturaleza, se presta especialmente para su utilización en los Sistemas de Información Geográficos.

2.9.2. PUNTOS DE CONTROL.

Por medios fotogramétricos se pueden determinar las coordenadas espaciales (X, Y, Z) de puntos sobre el terreno, para densificar los puntos que ya se conocen, y los cuales son obtenidos por medios topográficos.

2.9.3. FOTOMOSAICO.

Es un ensamblaje de dos o más fotografías que presentan entre ellas un área común. Se clasifican en:

- Controlados: fotos rectificadas y trianguladas.
- Semicontrolados: fotos rectificadas o trianguladas.
- No controlados: fotos sin rectificar ni triangular.

2.9.4. ORTOFOTO.

Es una fotografía o un conjunto de fotografías cuyas imágenes de los objetos se encuentran en su verdadera posición planimétrica.

Esto se logra mediante un proceso denominado rectificación diferencial, en el cual se eliminan los efectos de la inclinación y del desplazamiento por relieve, propios a las fotografías. Por ello, las ortofotos son equivalentes a los mapas de líneas en lo referente a su precisión geométrica.

Para la realización de la ortofoto es necesario crear el modelo estereoscópico del terreno, para de esta forma, proyectar en forma ortogonal, mediante el uso de la rectificación diferencial, la fotografía izquierda del modelo sobre película fotográfica, la cual, una vez revelada, es la ortofoto.

2.9.5. ORTOFOTO. ESTEREOSCÓPICA.

Está conformada por dos imágenes, donde la imagen izquierda es una ortofoto de la fotografía izquierda y la imagen derecha es una ortofoto de la fotografía derecha, la cual contiene la suma de las paralajes en x obtenidos de las variaciones de altura de los puntos correspondientes del terreno.

Esta última ortofoto es denominada *estereomate*, la cual puede ser considerada como una proyección paralela oblicua del terreno, sobre el plano de proyección.

2.9.6. ORTOFOTOMAPA.

Es una ortofoto hecha a una escala determinada, sobre la cual se añade la información convencional que posee un mapa.

Es decir se le adiciona la información extraída en forma vectorial.

2.9.7. PRODUCTOS PARA ILUSTRACIÓN ESTEREOSCÓPICA.

Constituyen una valiosa herramienta en aquellas ilustraciones donde mostrar el relieve es el fin fundamental. Son frecuentemente utilizadas en geología, donde es indispensable mostrar las formaciones en tres dimensiones, y ciencias forestales, donde es importante definir las diferencias de altura en diversas coberturas vegetales contiguas.

2.10. LA VISIÓN ESTEREOSCÓPICA.

La visión en relieve se logra en la vida real por la visión simultánea de los objetos desde distinto ángulo, el correspondiente a cada ojo, y su coordinación mental. Gracias a esta doble visión podemos apreciar distancias, espesores, profundidades, etc., es decir, todas las magnitudes tridimensionales. Si la visión se efectúa a través de un solo ojo, este sentido de dimensión desaparece, aunque por la costumbre se tenga una sensación del relieve que no corresponde a la percepción de dicho momento. Esta característica se denomina *diferencia de paralaje*, que permite calcular las distancias, y que sólo es posible en la zona de visión común a los dos ojos. El origen de esta sensación está en la diferencia entre las imágenes que percibe cada uno de los ojos de una persona cuando mira a distintos objetos colocados en la misma dirección.

La visión estereoscópica tiene sus límites para el hombre; a distancias menores de 25 cm requiere un esfuerzo excesivo para enfocar los dos ojos (bizquear); a 10 cm es ya imposible obtener una sola imagen.

En muchos animales, cuyos ojos están situados en posición muy lateral, esta limitación es mucho mayor y son incapaces de calcular distancias próximas (toros o ballenas). Otros tienen unas condiciones naturales muy superiores a las del hombre, especialmente los monos arborícolas y las rapaces nocturnas.

Para lograr sensación de relieve es necesario mirar un par estereoscópico, observando el mismo punto con cada ojo en una fotografía distinta. Esto raras veces se logra directamente y en 1838 Wheatstone idea el estereoscopio. Se trata de un instrumento muy sencillo dotado de dos lentes, a través de las cuales se miran las fotografías. (

Figura 2. 7)²⁷



Figura 2. 7. Estereoscopio

²⁷ Imagen tomada de web <http://www.ciat.cgiar.org/dtmradar/estereoscopia-paralaje.htm>

CAPÍTULO 3

PLANIFICACIÓN DE UN PROYECTO FOTOGRAMÉTRICO.

3.1 INTRODUCCIÓN.

La ejecución de un proyecto fotogramétrico, requiere antes de comenzar los trabajos un Planeamiento cuidadoso.

Este planeamiento consiste en proporcionar la cobertura fotográfica de la Zona a levantar, cumpliendo con unas especificaciones suministradas por el cliente y reflejadas en el pliego de condiciones.

De su buena ejecución dependerá la comodidad, rapidez y precisión del resto de los trabajos.

Al realizar la planificación, hay que tener en cuenta todos los factores que inciden en el vuelo para Evitar atrasos, errores y cambios de planes en los momentos críticos del vuelo.

Un proyecto fotogramétrico podemos dividirlo en tres fases:

1. **Planificación del vuelo** que debe seguirse para tomar todas las fotografías aéreas que se usarán En el proyecto.
2. **Planificación del control terrestre**, así como la ejecución de todos los trabajos topográficos Que satisfagan la precisión requerida por el proyecto.
3. **Estimación de los costos** que conlleva el proyecto.

A partir de un proyecto fotogramétrico dado podemos obtener diversos productos, incluyendo los Contactos de las fotografías aéreas, fotomapas, mosaicos, mapas topográficos (planimetría y Altimetría), perfiles transversales, modelos digitales del terreno, mapas catastrales...etc.

3.2. PLANIFICACIÓN DEL VUELO.

Es la fase principal, ya que el éxito final de cualquier proyecto fotogramétrico depende más de las Fotografías de buena calidad que de otros aspectos.

Se llama **proyecto de vuelo** al conjunto de cálculos previos a la realización de un vuelo Fotogramétrico, mediante los cuales se organiza las operaciones para conseguir el fin propuesto con las condiciones que se han establecido.

La misión del vuelo fotogramétrico tiene por objeto:

- ④ Sobrevolar la zona a una altitud que debe calcularse en función de la escala deseada y de la Distancia principal de la cámara.
- ④ Cubrir con sus imágenes una determinada zona y para ello es preciso que cada fotograma tenga una zona común con las contiguas "zona de recubrimiento".

Para que puedan cumplirse estos objetivos, el avión deberá volar a una altitud constante, Siguiendo una ruta predeterminada y a una velocidad constante, para poder realizar sus disparos con intervalos regulares, que se corresponden a recorridos iguales.

En la planificación de un vuelo existen una serie de decisiones previas tales como la escala del Mapa, formato de los fotogramas, proyección del mapa, elipsoide de referencia. etc., que han de Tenerse en cuenta a la hora de organizar el planeamiento, ya que afectan a las condiciones del vuelo.

Existen otras condiciones que se refieren a la calidad de la fotografía tanto en su aspecto geométrico, como en el fotográfico.

Aspectos geométricos de la fotografía aérea:

- ④ Certificado de calibración de la cámara: nos dará los parámetros de orientación interna (Distancia principal, punto principal, coordenadas de las marcas fiduciales, distorsiones).
- ④ Escala de la fotografía.
- ④ Recubrimientos longitudinales y laterales.
- ④ Seguridad de un recubrimiento total en toda la zona.
- ④ Arrastre de la imagen sobre la fotografía.

- 🌐 Horas útiles de tomas fotográficas.

En cuanto a **las condiciones fotográficas**, podemos citar:

- 🌐 Contraste fotográfico de la película.
- 🌐 La calidad de la imagen.
- 🌐 La homogeneidad de tonalidad.
- 🌐 La ausencia de nubes.
- 🌐 Longitud e intensidad de las sombras.

La buena ejecución de un planeamiento de vuelo puede estudiarse desde diversos puntos de vistas:

Desde un punto de vista técnico:

- 🌐 El modelo estereoscópico presentará lo más uniforme posible una escala y unos recubrimientos, y este será de superficie máxima.
- 🌐 La fotografía aérea será tan vertical como sea posible y deberá existir una buena información para poder enderezar los desplazamientos angulares.
- 🌐 La fotografía cumplirá las condiciones propias de aplicación métrica.

Desde el punto de vista económico:

La superficie que ha sido cubierta con el menor número de fotogramas para la escala elegida, Tendrá un menor número de modelos, con lo cual disminuirá el número de trabajos, aumentando de Esta forma el rendimiento.

Con lo visto hasta, ahora podemos decir que el planeamiento de vuelo debe ser planificado Cuidadosamente y ejecutado fielmente de acuerdo con un plan de vuelo, que consta de dos puntos:

1. Un **mapa de vuelo** que muestra donde deben ser tomadas las fotografías.
2. **Especificaciones** que trazan como deben tomarse, incluyendo requisitos concretos tales como Cámara, película, escala, altura de vuelo, recubrimientos, inclinaciones permitidas...etc.

3.2.1. PROPÓSITO DE LA FOTOGRAFÍA.

En el planeamiento de vuelo hay que considerar cual va a ser la utilización de la fotografía. Una vez que tengamos definido esto, puede seleccionarse cual será el equipo óptimo a utilizar, así como los Procedimientos.

De los diferentes usos que pueden hacerse de las fotografías aéreas, se deseará para la obtención de Planos por fotogrametría aérea, unas buenas condiciones métricas de las fotografías, ya que se van a Efectuar sobre ellas precisas mediciones. Estas se obtienen usando cámaras calibradas, película con Granulometría fina, tiempos de exposición cortos y emulsiones de alta resolución.

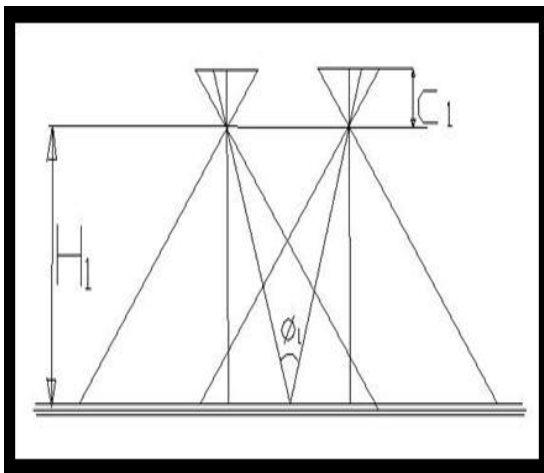


Figura 3. 1. Distancia principal C1

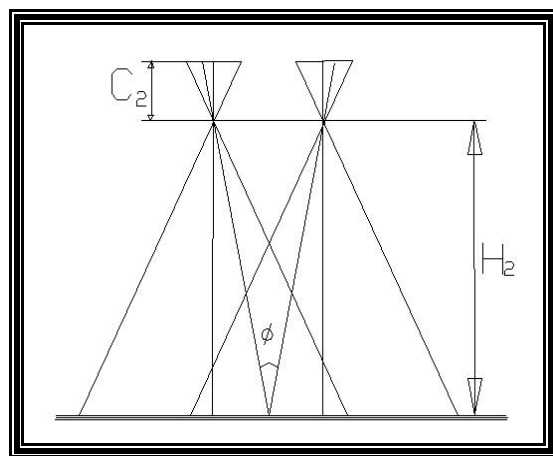


Figura 3. 2. Distancia Principal C2

Para la obtención de mapas topográficos es aconsejable tomar las fotografías con cámaras Gran angular o Súper gran angular, para obtener una amplia relación base altura (B/H).

Sean las Sigüientes figuras con igual base entre tomas:

En la (Figura 3. 1) la distancia principal (c_1) y la altura de vuelo (H_1) son la mitad que las de la (Figura 3. 2) $c_2 = 2c_1, H_2 = 2H_1$.

Las escalas fotográficas son iguales, pero la relación $\frac{B}{H}$ es doble en la (figura 3. 2), así como los ángulos paralácticos $[(\phi)_2 = \phi_1]$.

Puede demostrarse que los errores en calcular la posición y elevación de puntos en un modelo Estereoscópico, aumentan con vuelos de gran altura. Por lo tanto una condición favorable para la Obtención de buenas precisiones en la determinación de puntos por fotogrametría es realizar vuelos Bajos y ángulos paralácticos grandes, es decir empleo de cámaras granangulares o súper gran angular.

$$dZ = \frac{H}{B} m_b dp_a \Rightarrow dZ_1 = 2dZ_2$$

3.2.2. ELECCIÓN DE LA ESCALA DE LA FOTOGRAFÍA.

La elección de la escala de la fotografía es función de la escala de representación (escala del plano a Representar) y del tamaño de los objetos que se pretenden detectar; es el primer problema que hay que resolver.

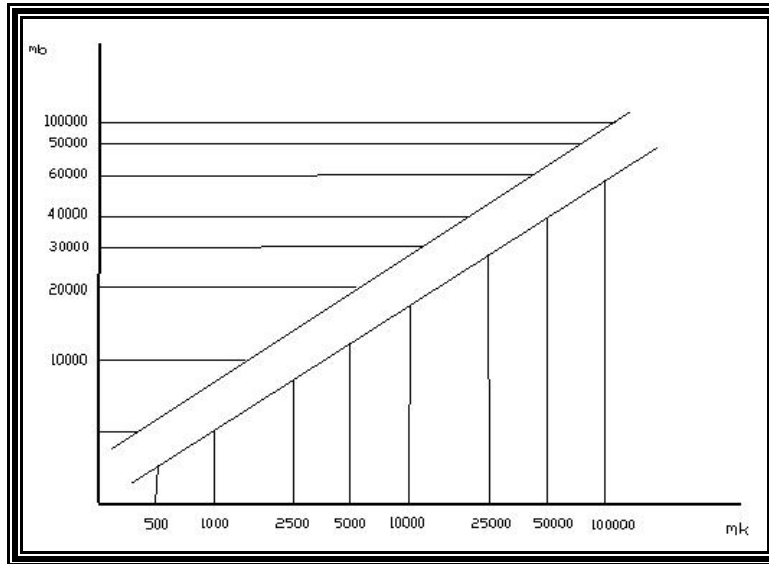


Figura 3. 3. Relación entre escala, imagen y plano

La relación entre la escala de la imagen $\left(Mb = \frac{1}{mb}\right)$ y la del plano $\left(Mk = \frac{1}{mk}\right)$ que se trata de Obtener por medios fotogramétricos, viene dada según la grafica de la Figura 3. 3, relación que se justifica en el tema de teoría de errores.

Por otro lado la escala de la fotografía nos limitará la detección del tamaño de los objetos. Vamos a Admitir para la definición de un punto correspondiente a un detalle natural del terreno, con ayuda de Aparatos provistos de elementos de ampliación de imagen, los Sigüientes valores:

- 🌐 ml = 0.02 mm (Para un punto cualquiera en condiciones normales de observación).
- 🌐 ml = 0.01 mm (Detalle natural muy nítido o punto de apoyo señalado artificialmente en el Terreno).

Así por ejemplo, para las Sigüientes escalas podemos detectar el tamaño mínimo de los objetos:

1:mb	1:5000	1:10000	1:20000	1:30000
Punto Natural cualquiera	0.10m	0.20m	0.40m	0.60m
Punto De apoyo	0.050m	0.10	0.20m	0.30m

3.2.3. ALTURA DE VUELO. NIVEL DE REFERENCIA.

Una vez determinada cual será la escala de la imagen, y conocida la distancia principal de la Cámara de la toma, podemos obtener la altura de vuelo sobre el terreno:

$$Mb = \frac{1}{mb} = \frac{c}{H} \Rightarrow H = c \cdot mb$$

Anteriormente ya se dijo que existían tantos valores de la escala como puntos con distinta altitud, de Manera que H será la altura de vuelo media sobre el terreno.

La altura de vuelo sobre el nivel medio del mar H (dato del altímetro) vendrá dada por la altitud del Nivel de referencia en función del relieve del terreno (Figura 3. 4).

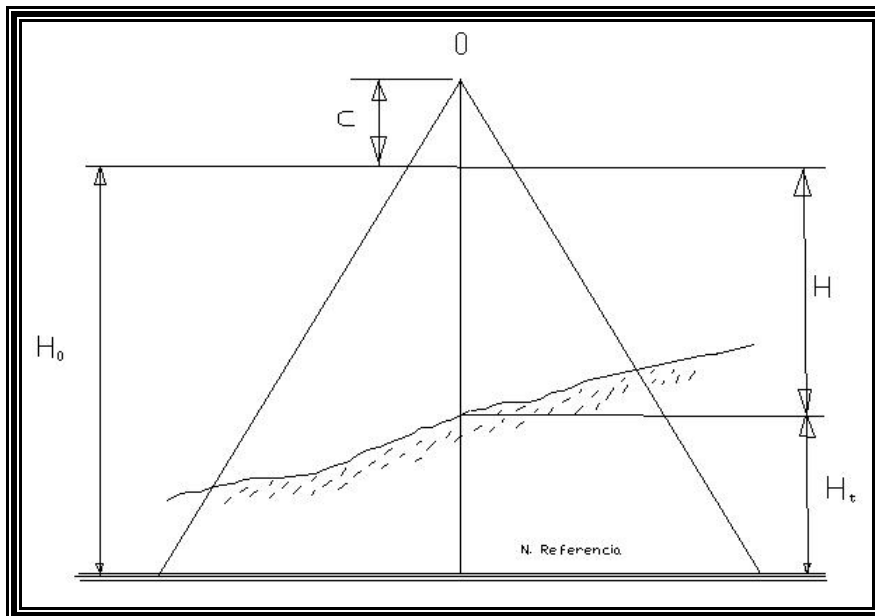


Figura 3. 4. Toma fotográfica aérea

$$H_0 = H + H_t \Rightarrow Mb = \frac{1}{Mb} = \frac{c}{H_0 - H_t}$$

Los mayores problemas en la planificación de un vuelo se nos van a presentar cuando el terreno es Montañoso. Abordaremos estos casos más adelante.

3.2.4. DISPOSICIÓN DE LAS FOTOGRAFÍAS. RECUBRIMIENTOS.

El objeto de los recubrimientos fotográficos es el de poder aplicar el principio de la visión Estereoscópica a los fotogramas aéreos.

La parte común entre dos fotografías consecutivas es el modelo estereoscópico, debiendo poderse enlazar estos modelos tanto longitudinalmente como transversalmente.

3.2.4.1. RECUBRIMIENTO LONGITUDINAL.

Supongamos la Siguiete situación ideal:

Eje principal estrictamente vertical, terreno llano y horizontal. Si un avión volando en línea recta y a una altitud constante, toma una serie de fotografías a intervalos iguales, estas fotos se alinean formando una banda o pasada fotográfica.

(Figura 3. 6 Y Figura 3. 5)

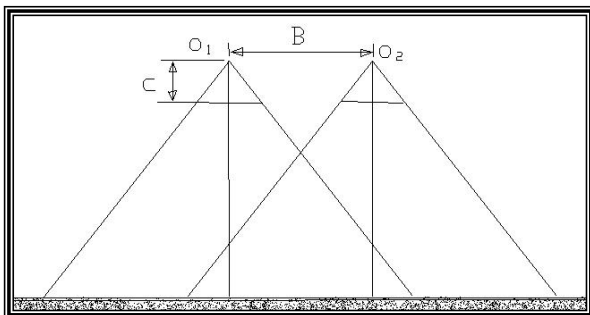


Figura 3. 5. Toma fotográfica de un modelo

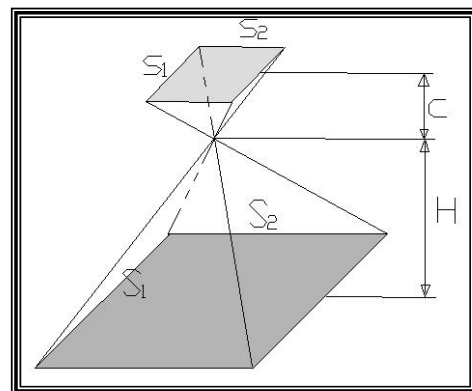


Figura 3. 6. Superficie cubierta por la fotografía

$$S_1 = mbs_1 \quad S_2 = mbs_2$$

Siendo B la distancia recorrida entre dos exposiciones sucesivas (base), dos fotos sucesivas tendrán una parte común si $B < s_1$, pero para que todo punto de la

zona cubierta aparezca dos veces es Necesario que $B < \frac{s_1}{2}$ Mapa de vuelo ideal (Figura 3. 7) con recubrimiento longitudinal del p%.

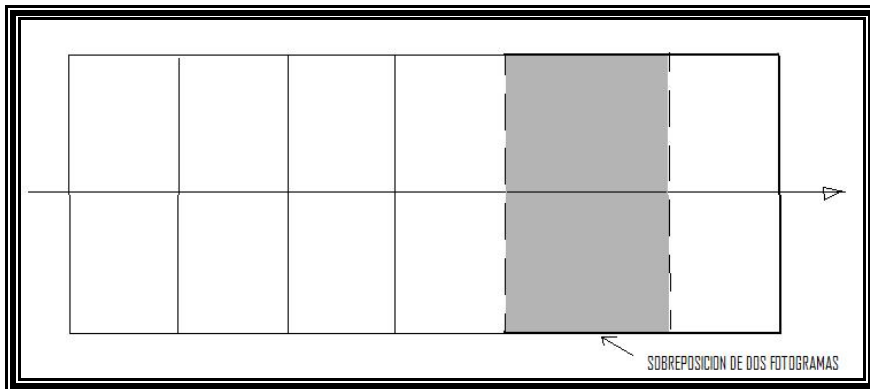


Figura 3. 7. Ejecución del vuelo fotogramétrico ideal

La forma y dimensiones de la superficie del terreno cubierta por las fotos son función de:

- 🌐 Variaciones en la altura de vuelo (Figura 3. 8).
- 🌐 La inclinación del eje vertical; si el eje de la cámara está inclinado, la superficie cubierta será trapezoidal (Figura 3. 9).
- 🌐 El relieve del terreno; la superficie se deforma de modo regular (Figura 3. 10).

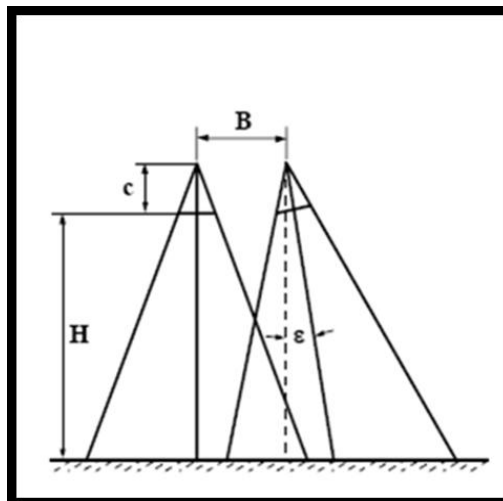


Figura 3. 8. Variaciones de Altura de Vuelo.

Estas variaciones de forma no deben causar defectos de recubrimiento estereoscópico, escogiéndose para B un valor menor de $\frac{s1}{2}$, es decir un recubrimiento superior al 50%, pero sin aumentar este margen, ya que en caso de

exceso aumentaríamos el número de pares, disminuyendo el rendimiento y por tanto la relación (B/H) de la que depende la precisión. Llamando $p\%$ al recubrimiento longitudinal expresado en tantos por ciento, se fija normalmente este en el 60%, con una tolerancia de $\pm 5\%$

$$B = s_1(1 - p) = s_1 mb(1 - p) = s_1 mb \left(1 - \frac{p\%}{100}\right)$$

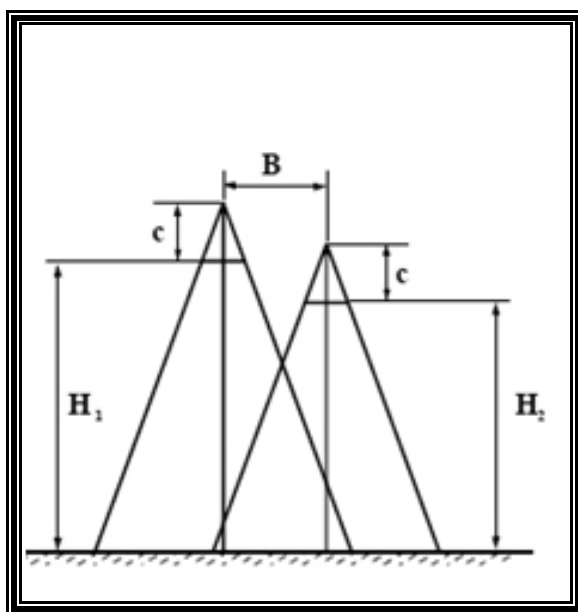


Figura 3. 9. Inclinación del eje Vertical.

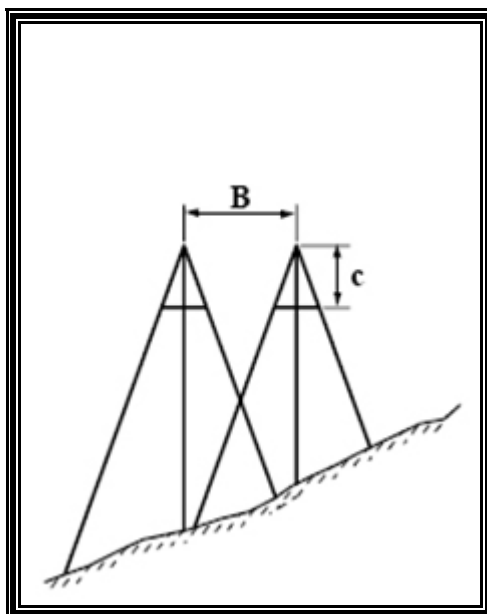


Figura 3. 10. El relieve del terreno.

3.2.4.2. RECUBRIMIENTO LATERAL (BLOQUES DE BANDAS PARALELAS)

Para cubrir un territorio extenso es preciso hacer varias bandas dispuestas lateralmente respecto a la primera. Deben ser paralelas y recubrirse de modo que no exista ningún hueco en la cobertura (Figura 3. 11).

El recubrimiento lateral ($q\%$) deberá ser mínimo para disminuir en lo posible el número de clichés, siendo A la distancia entre dos ejes de vuelo adyacentes, es preciso en terreno llano que $A \leq s_2$.

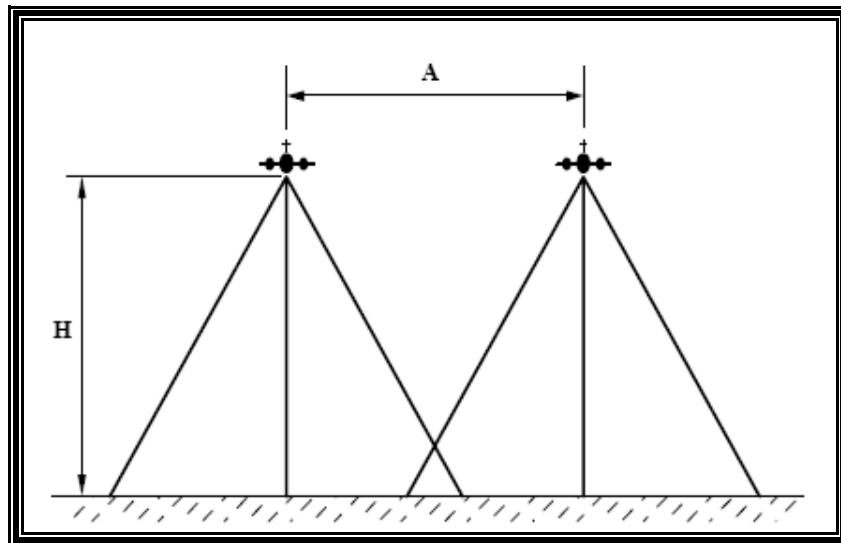


Figura 3. 11. Recubrimiento transversal entre pasadas adyacentes

Los defectos de recubrimiento lateral pueden ser resultado de:

- ④ La Inclinación del eje transversal.
- ④ El relieve del terreno.
- ④ Errores en el mantenimiento de la altitud.
- ④ Error en la apreciación de la magnitud A .
- ④ Error en la corrección de la deriva.
- ④ Errores en el mantenimiento de una ruta constante.

Suele escogerse un recubrimiento transversal de valores comprendidos entre el 10% y el 20 %.

$$A = S_2 (1 - q) = s_2 mb(1 - q) = s_2 mb \left(1 - \frac{q\%}{100}\right)$$

3.2.5. LA DERIVA

En la ejecución del vuelo fotogramétrico, como consecuencia del empuje del viento sobre el avión, tendríamos unos resultados no deseados; tales como huecos en el recubrimiento entre pasadas, disminución del recubrimiento transversal, mal seguimiento de los ejes de vuelo, etc. Por ello, a la hora de realizarse el vuelo, habrá que tener en cuenta este desplazamiento producido por el viento y corregirlo por medio de la deriva.

Llamemos "azimut verdadero" al eje de simetría del avión (A_v). En ausencia de viento el eje de vuelo coincide con (A_v).

Si existiese viento, la masa de aire en la que se desplaza el avión se mueve respecto al suelo, estando sometido el avión a dos fuerzas (Figura 3. 12):

- ✓ \vec{V}_p = Fuerza de los motores del avión, la cual imprime una velocidad y dirección.
- ✓ \vec{V}_v = Fuerza del viento.

La trayectoria del avión sería la resultante de las dos fuerzas (\vec{V}_s), velocidad con respecto del suelo.

El ángulo entre la ruta verdadera y el acimut verdadero es la deriva (d). Si los lados del formato de la película son paralelos y perpendiculares al avión, el recubrimiento que se obtenga habrá disminuido la superficie útil a utilizar (Figura 3. 13 , Figura 3. 14, Figura 3. 15)²⁸.

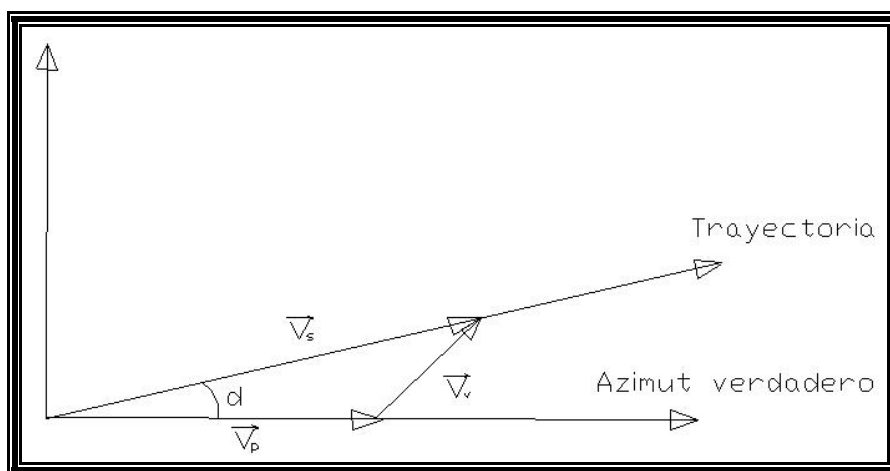


Figura 3. 12. Efecto de la fuerza del viento (deriva) sobre la trayectoria verdadera.

²⁸ Fuente. <http://www.mappinginteractivo.com>

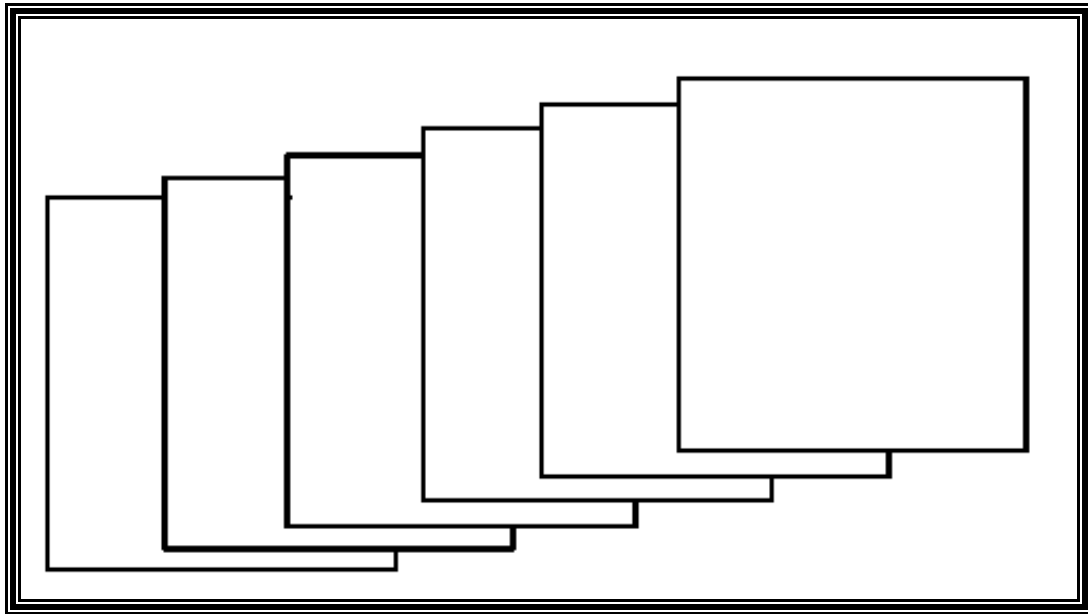


Figura 3. 13. Efecto de la deriva en una pasada

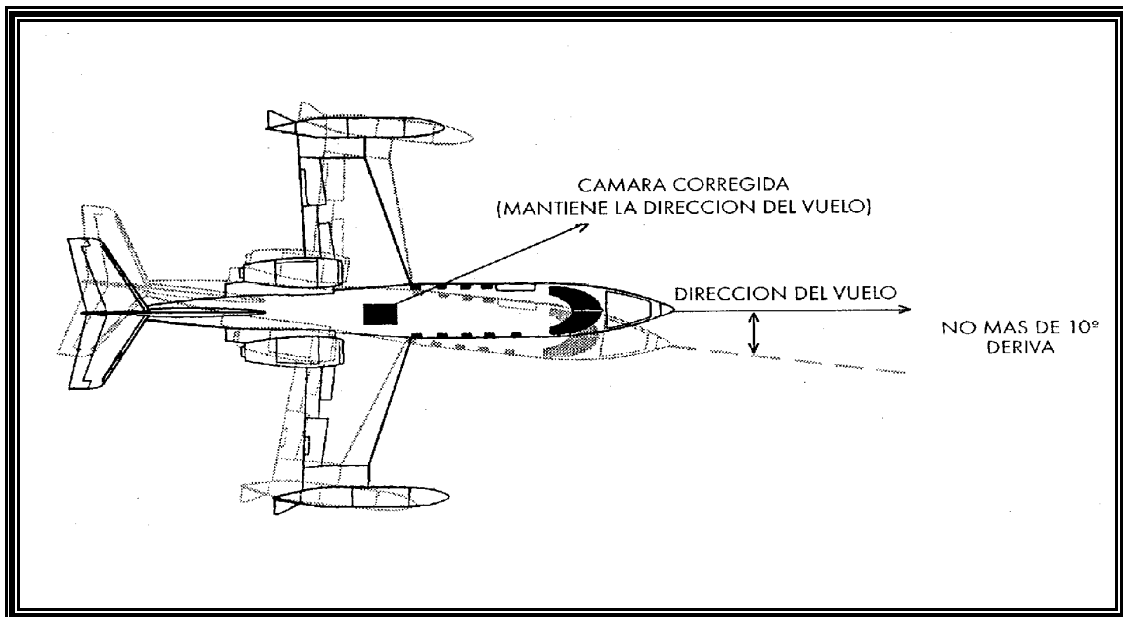


Figura 3. 14. La deriva se presenta en la dirección de vuelo por diferentes factores atmosféricos.²⁹

²⁹ Fuente. <http://www.mappinginteractivo.com>

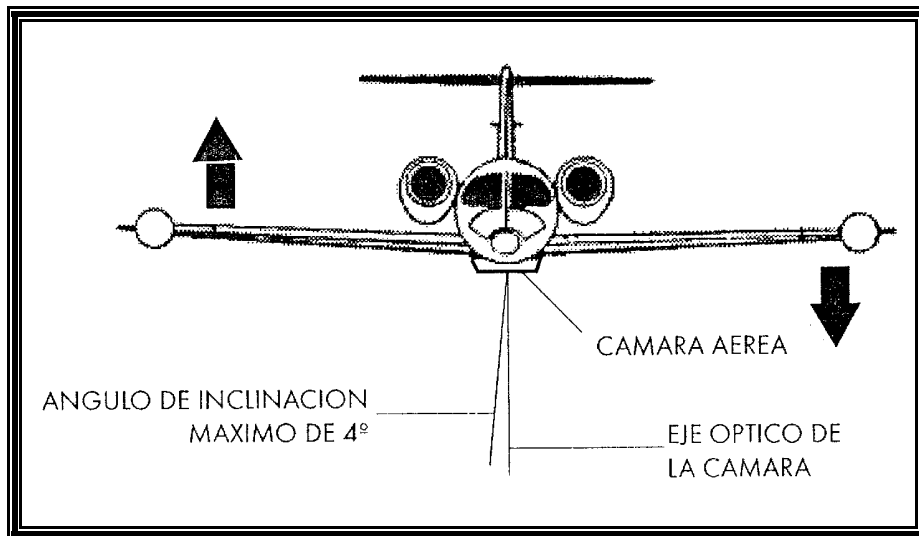


Figura 3. 15. El aire pega en las alas del avión; a este movimiento se le conoce como alabeó.

Para ello es preciso girar la cámara a bordo para que un lado del formato sea paralelo a la ruta verdadera, de manera que hay que determinar constantemente el ángulo de deriva (d) y girar la cámara un ángulo ($-d$) (Figura 3. 16)³⁰.

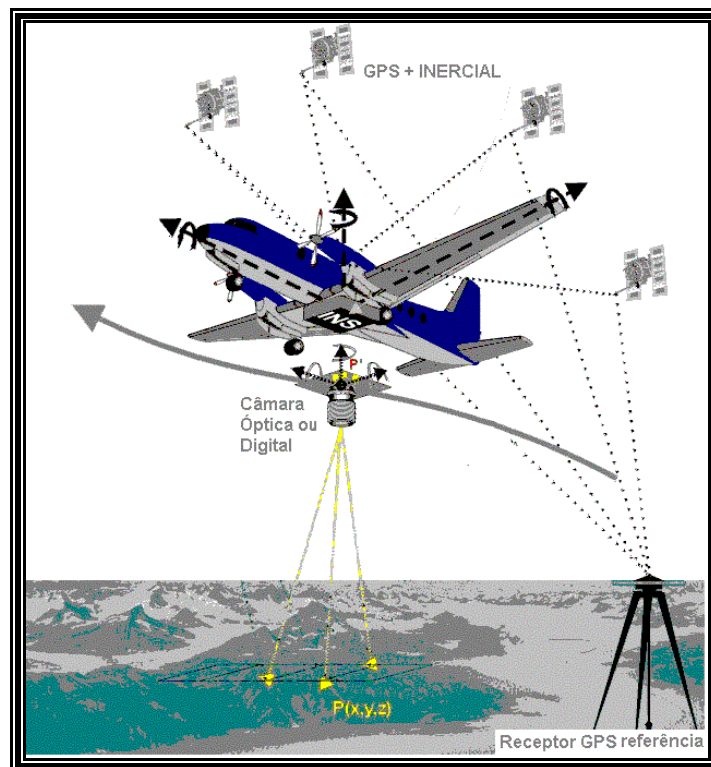


Figura 3. 16. Vuelo Fotogramétrico y ajuste de la cámara

³⁰ Fuente. <http://www.mappinginteractivo.com/prin-comi.asp>

3.2.6. PLANIFICACIÓN DEL VUELO EN TERRENO MONTAÑOSO

Los mayores problemas a la hora de la planificación de un vuelo, se presenta cuando el terreno es montañoso. En estos casos el nivel de referencia (H_t) deberá escogerse, de modo que no produzca huecos en los recubrimientos entre fotografías en los puntos altos del terreno, caso de la (Figura 3. 17), donde PB no quedará reflejado en la segunda fotografía.

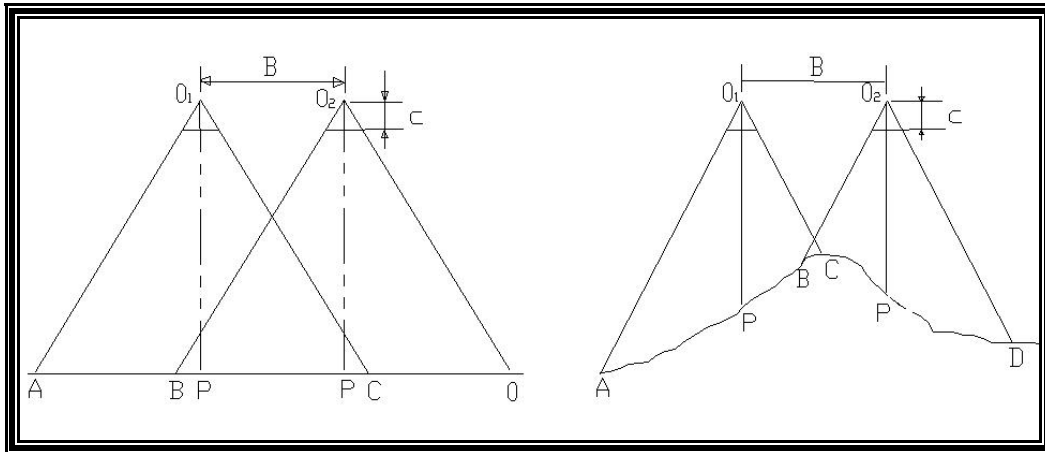
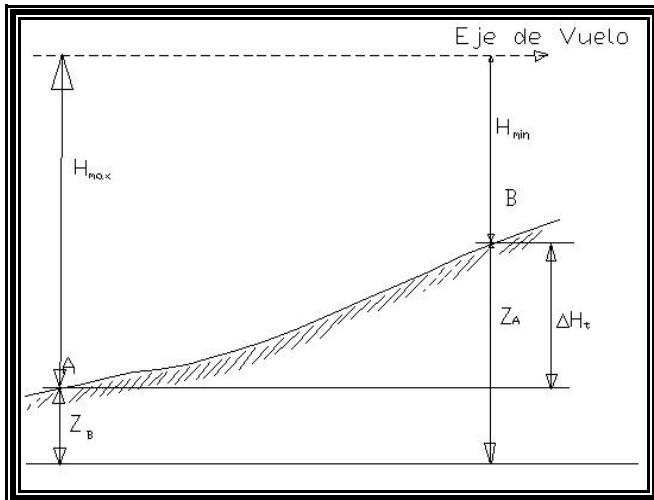


Figura 3. 17. Defectos producidos en el recubrimiento longitudinal.

En estos casos se fijan unos límites de variación del desnivel, a partir de las tolerancias fijadas para la variación de la escala (tolerancia que vendrá expresada en el Pliego de Condiciones).



$$mb_{max} = \frac{1}{mb_{max}} = \frac{c}{H_{min}}$$

$$mb_{min} = \frac{1}{mb_{min}} = \frac{c}{H_{max}}$$

$$mb_{min} - mb_{max} = \frac{H_{max} - H_{min}}{c} = \frac{\Delta H_t}{c}$$

$$\Delta H_t = c[(mb)_{min} - mb_{max}]$$

Figura 3. 18. Determinación de los desniveles admisibles.

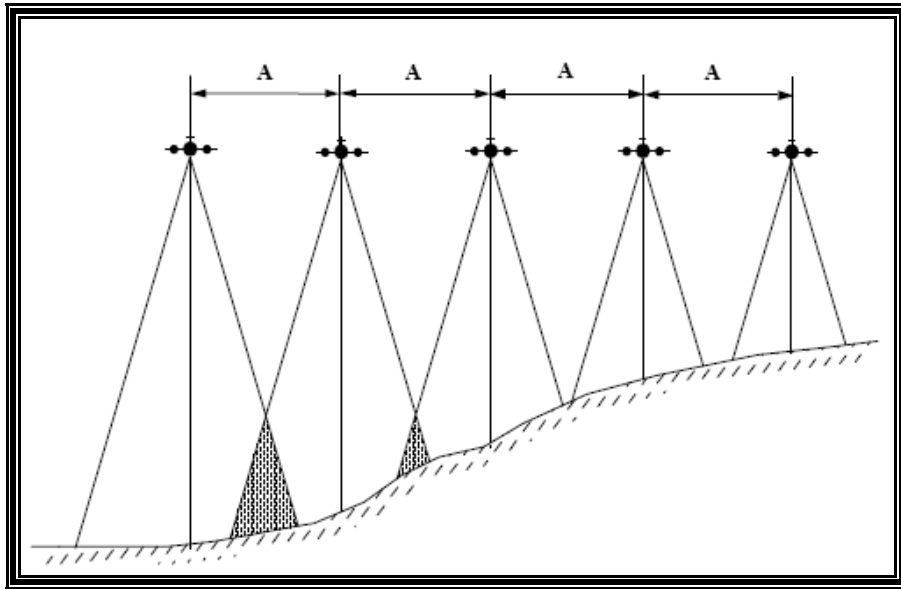


Figura 3. 19. Vuelo con disminución del recubrimiento transversal.

En terreno montañoso habrá que tener también en cuenta a la hora de la planificación, las variaciones entre el espaciado de la línea de vuelo, que se van a producir en la toma de un bloque de bandas.

Si calculamos la distancia entre ejes de vuelo (A), tal y como se realiza en terreno llano, estaríamos disminuyendo el recubrimiento lateral en las pasadas que se realizan sobre zonas de terreno más elevadas (Figura 3. 19).

Sobre la cartografía existente, se estudian las diversas altitudes del terreno de la zona objeto de estudio, procediendo a calcular el espaciado entre las líneas de vuelo, requeridas para proporcionar el adecuado recubrimiento lateral, pudiendo variar este según la tolerancia fijada en el Pliego (Figura 3. 20).

Si el terreno cambia de una manera gradual, se podría aumentar la altitud del vuelo de una forma progresiva, de modo que mantendríamos la escala global tan constante como fuera posible. En este caso estamos variando la altura de referencia, a medida que varía la altura del terreno (figura 3.20).

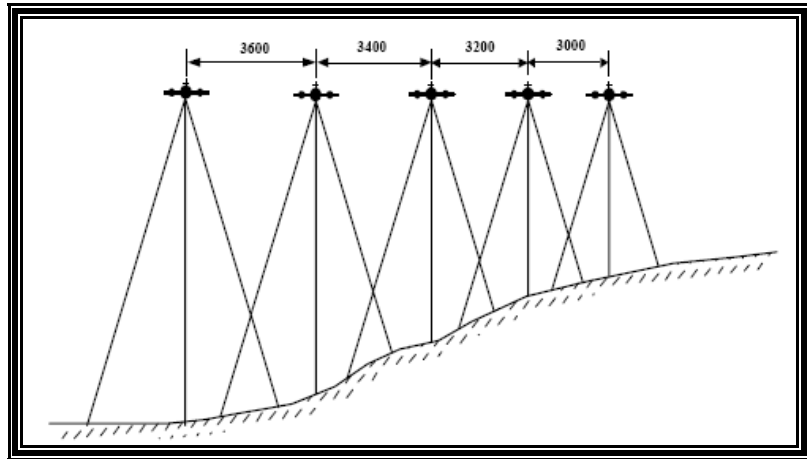


Figura 3. 20 Planificación del vuelo con variaciones en el espaciado entre líneas de vuelo.

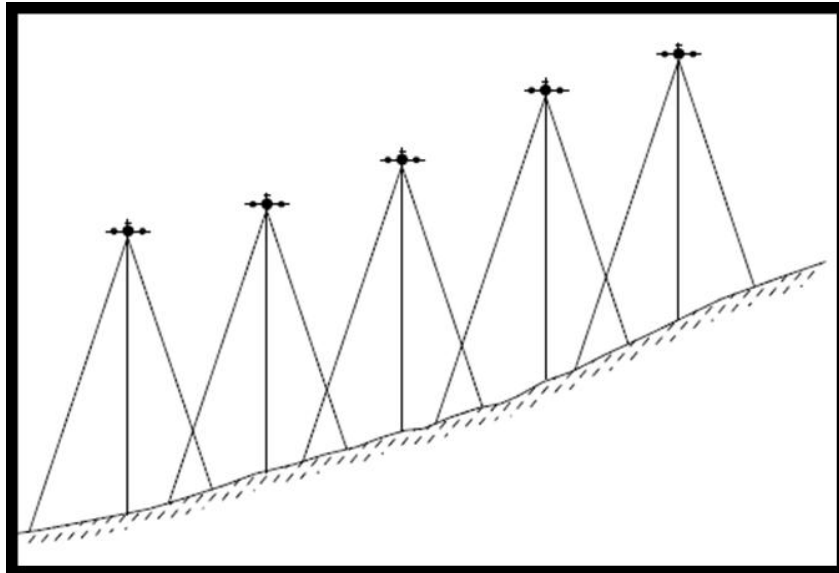


Figura 3. 21. Planificación del vuelo con variaciones en la altura de vuelo entre pasadas.

3.2.7. MAPA DE VUELO

El mapa de vuelo proporciona los límites del Proyecto, los ejes de vuelo muestran al piloto por donde debe volar para obtener el recubrimiento deseado. El mapa de vuelo se prepara sobre algún mapa ya existente de la zona, marcando sobre esta cartografía, la zona objeto del Proyecto. Calculada la dimensión del territorio correspondiente a cada foto a la escala del mapa, se indican sobre éste los correspondientes ejes de vuelos de cada pasada, cuidando de mantener el recubrimiento lateral previsto. Sobre los ejes de vuelo y a intervalos regulares a que correspondan el recubrimiento propuesto, se marcan los puntos sobre cuya vertical, deberá realizarse la exposición de la película.

Considerando un vuelo ideal, el punto central de cada fotografía coincidirá con los puntos Propuestos, estando todos éstos sobre la misma recta en cada pasada, siendo las pasadas rigurosamente paralelas.

Si la zona donde vamos a trabajar es regular, los ejes de vuelos suelen estar orientados *Norte-Sur* o *Este-Oeste*, numerando las pasadas según este criterio, así como las fotografías de cada pasada (Figura 3. 22).

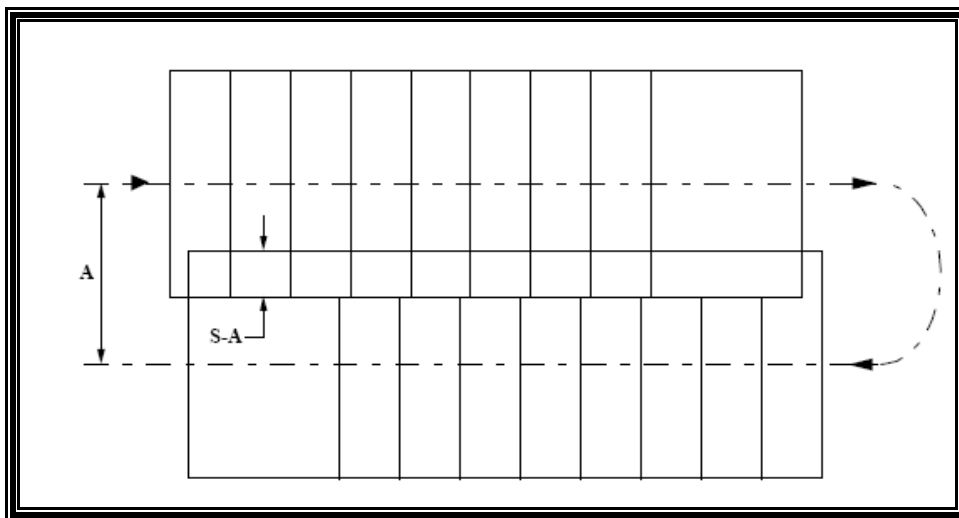


Figura 3. 22. Ejes de vuelo con orientación N-S y E-O.

Si la zona del proyecto es una característica particular del terreno, es decir, tiene forma irregular, o si es larga, estrecha y girada de las direcciones cardinales (cauces de ríos, trazados de nuevas Carreteras, líneas costeras,.....etc.) no resultará económico volar en las direcciones *Norte-Sur* o *Este-Oeste* (obtendríamos muchas pasadas con pocos fotogramas útiles), es evidente que habría que volar las mayores longitudes de línea (paralelamente a los límites de la zona) (Figura 3. 22)

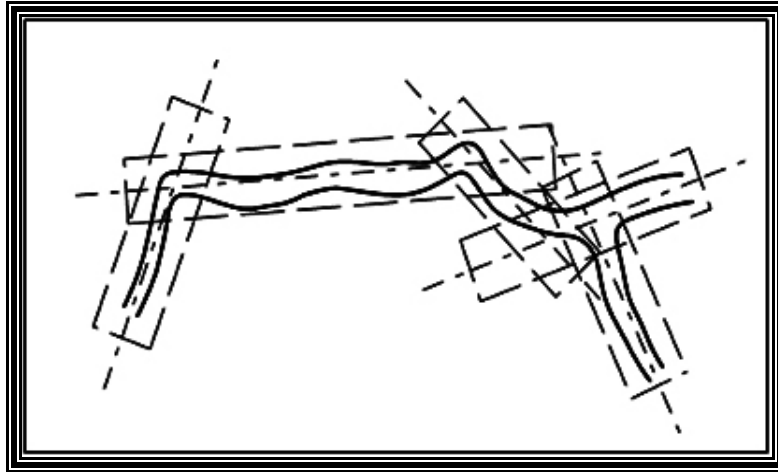


Figura 3. 23. Planificación de un vuelo fotogramétrico sobre una zona de terreno lineal.

3.2.8. LOS PARÁMETROS DE UN VUELO VERTICAL.

Partamos de un caso ideal (Figura 3. 7), donde el avión a una altura H , recorrerá el terreno a levantar disparando el obturador de la cámara a intervalos regulares de tiempo, de manera que cada dos fotogramas dispongan del recubrimiento adecuado y se distribuyan sus pasadas sobre el terreno en trayectorias paralelas, barriendo la zona por pasadas que dispongan a su vez de suficiente recubrimiento lateral, para poder solapar unas con otras.

Donde:

- s = Lado del negativo
- P = Punto principal en O_1
- F_a = Superficie del terreno a cubrir
- P' = Punto principal en O_2
- c = constante de la cámara
- b = Fotobase
- V_g = Velocidad del avión

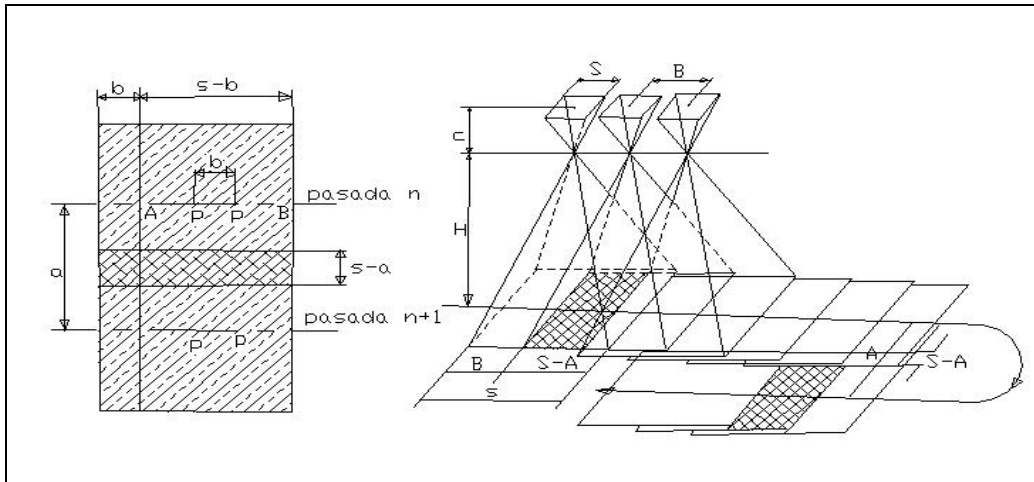


Figura 3. 24. Disposición ideal de fotografías

🌐 Recubrimiento longitudinal:

$$p = \overline{P'A} + \overline{P'B} = \overline{P'A} - \overline{P'B} - \overline{PP'} = \frac{s}{2} + \frac{s}{2} - b = s - b$$

$$p\% = \frac{(s - b)100}{s}$$

🌐 Recubrimiento Transversal

$$q\% = \frac{(s - a)100}{s}$$

Siendo "a" la distancia entre los puntos principales de dos pasadas consecutivas.

🌐 Escala de la imagen:

$$Mb = \frac{1}{Mb} = \frac{c}{H} = \frac{s}{S}$$

🌐 Superficie cubierta por una foto

$$Fg = S^2 = (smb)^2$$

🌐 Longitud de la base con recubrimiento longitudinal del p%

$$b = s \left(1 - \frac{p\%}{100}\right) \text{ (fotobase)}$$

$$b = bmb = s \left(1 - \frac{p\%}{100}\right) \text{ (base)}$$

☉ Intervalo entre pasadas:

$$a = s \left(1 - \frac{q\%}{100} \right)$$

$$A = s \left(1 - \frac{q\%}{100} \right)$$

☉ Número de fotos por pasadas:

$$np = \left(\frac{Lp}{B} \right) + 1$$

☉ Numero de pasadas:

$$nq = \left(\frac{Lq - S}{A} \right) + 1$$

☉ Superficie esteresocópica por par:

$$Fm = (S - B)S$$

☉ Superficie adicional por foto:

$$Fn = AB = S^2 \left(1 - \frac{p\%}{100} \right) \left(1 - \frac{q\%}{100} \right)$$

☉ Numero de fotos necesarias: $nt = np nq$ (supuesta la superficie uniforme)

☉ Intervalo entre exposiciones

$$\Delta t = \frac{B}{Vg} = \frac{smb}{Vg} \left(1 - \frac{p\%}{100} \right)$$

Para terreno accidentado se hace adoptar una cadencia de exposiciones variables, función del perfil del terreno a lo largo del eje de vuelo, ya que si adoptamos un intervalo constante, para las altitudes del terreno superiores a las del nivel de referencia, se tendrán recubrimientos insuficientes en las partes altas y excesivos en las bajas.

Arrastre de la imagen sobre la película:

El arrastre de la imagen sobre la película se detecta como una pérdida de la nitidez en ésta. Al tomar fotografías y encontrarse la cámara en movimiento, será preciso regular el tiempo de exposición en combinación con la velocidad del avión, para que el arrastre que se origine se encuentre dentro de unos límites que se consideren tolerables, dentro del concepto de nitidez fotográfica.

Las causas que pueden motivar el arrastre de la imagen son:

- 🌐 Desplazamiento de la cámara en la dirección del vuelo.
- 🌐 Vibraciones de la cámara transmitidas por el avión.
- 🌐 Balanceo del avión.

El primer efecto es mucho mayor que los otros dos, los cuales con un buen montaje de la cámara sobre los sistemas de suspensión anti vibrantes, buenas condiciones atmosféricas y un buen pilotaje, Quedarán prácticamente anulados.

Siendo V_g (velocidad del avión), Δt (tiempo de obturación de la cámara) y M_b (escala de la imagen).

$$\Delta s = V_g \Delta t M_b$$

$$\Delta s \approx 278000 V_g \Delta t M_b$$

Ejemplo:

Tabla 3. 1. Velocidad del avión Vs tiempo de obturación de la cámara.

		$\Delta s \mu m$				
		$\Delta t s_g$	$\Delta t s_g$	$\Delta t s_g$	$\Delta t s_g$	$\Delta t s_g$
V_g 100 Km/h	M_b	1:100	1:200	1:300	1:500	1:1000
	1:1000	278	139	93	56	28
	1:5000	56	28	19	11	6
	1:10000	28	14	9	6	3

Para una determinada escala de la imagen, el avión deberá tener una velocidad de crucero tal que, combinada con los tiempos de exposición de la cámara, de un valor tolerable de nitidez ($\leq 0.03mm$).

3.2.9. MÉTODOS DE NAVEGACIÓN FOTOGRÁFICA.

Un método de navegación tiene por objeto guiar al avión entre un punto de partida y uno de llegada, conociendo su posición en todo momento. Generalmente las trayectorias vienen impuestas por el trabajo, de forma que el avión fotográfico no puede apenas separarse de su trayectoria, para asegurar el recubrimiento lateral. Existen varios métodos de navegación:

3.2.9.1. NAVEGACIÓN A SIMPLE VISTA CON CARTOGRAFÍA DISPONIBLE.

Se representan, sobre los mapas-índices, los ejes de vuelo o pasadas y la situación con el menor error posible, de los puntos principales de los fotogramas. El navegante tratará de seguirlos ayudado por la indicaciones de un telescopio de navegación, que permite usar referencias hacia adelante y hacia atrás.

Las pasadas irán numeradas, así como todos los fotogramas de inicio y fin de la pasada, que llevarán rotulado su número de exposición.

3.2.9.2. NAVEGACIÓN A SIMPLE VISTA SIN CARTOGRAFÍA PREVIA.

Muchas veces en los países en desarrollo, la cartografía de la zona está muy atrasada, es inexacta o no existe.

En estos casos el navegante recurre a algún método " **sin mapa** " para obtener una completa cobertura fotográfica.

Existen diversos métodos de navegación sin cartografía, entre los cuales citaremos:

Sobrevuelo a mayor nivel:

Se usa este método cuando la zona de trabajo es relativamente pequeña (ciudades, áreas de ríos, pequeños proyectos de desarrollo, emplazamiento de presas, etc.).

Este método consiste en fotografiar inicialmente la zona de trabajo desde una gran altitud y a menor escala. Sobre las fotografías obtenidas anteriormente, se marcan las pasadas fotográficas a la escala correcta elegida para el vuelo final, ejecutando el vuelo basándose en la información obtenida.

En la utilización de este método, la primera operación que hay que decidir es la escala necesaria para sobrevolar el área. Hay que tener en cuenta el tamaño del área requerida y la escala a la cual el navegante tiene que volar la misión final.

🌐 Vuelo de franjas entrelazadas:

Este método se usa para zonas de trabajo más extensas.

Al igual que en el método anterior, se empezará por realizar un vuelo a una escala menor (mayor altitud), para preparar el material básico mediante franjas enlazadas (Figura 3. 25).

Se planificará la zona de trabajo a sobrevolar de manera que fuera mayor que la solicitada.

Obtenidas las copias, se unen entre si para formar franjas, estableciendo la línea central y las transversales de manera que el detalle común de ambas quede alineado. Sobre la franja central se dibuja un eje de vuelo y se agregan el resto de los ejes de vuelo a ambos lados, hasta completar la zona de trabajo a obtener.

Establecidos todos los ejes de vuelo de las pasadas, se pueden numerar las pasadas para su organización, procediendo a realizar el vuelo a la escala final apoyándonos en la Información aportada por las fotografías anteriores.

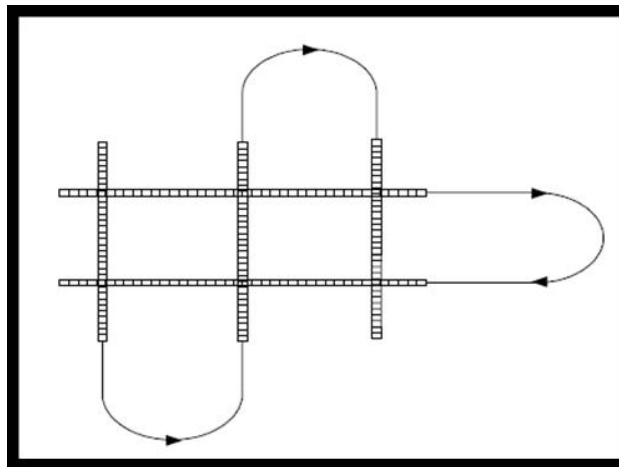


Figura 3. 25. Vuelo de franjas entrelazadas.

🌐 Navegación de línea lateral:

Es el método más simple desde el punto de vista de la planificación, pero exige un gran respaldo en cuanto a producción fotográfica.

Se basa en una o más pasadas principales que van a ser usadas para lo que se llama seguimiento de la línea lateral. De nuevo el bloque se planifica más grande de lo necesario.

Se realiza un vuelo de reconocimiento previamente para pruebas de exposición y planificación de la pasada principal. Efectuadas estas pruebas, se procede a la toma de las fotografías de la pasada principal con las especificaciones correctas para el vuelo; al final de la pasada el avión vuelve a la base y se procesa la película. Se hace un conjunto de copias y se forma la pasada trazando una línea central (eje de vuelo).

A partir de ésta se trazan dos ejes paralelos con el recubrimiento lateral especificado.

Una vez que están marcadas las dos nuevas pasadas se vuelve a realizar otro vuelo para la obtención de los fotogramas de las nuevas pasadas. El navegante usará como referencia para la toma de estas nuevas fajas, la línea del recubrimiento lateral, de esta forma tendrá una información terrestre visible en el área de recubrimiento $q\%$.

Efectuadas estas nuevas tomas, el avión vuelve a la base, se obtienen las copias y sobre estas nuevas tomas se repite el proceso.

3.2.9.3. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN AVANZADOS.

Los sistemas electrónicos de navegación están basados en el conocimiento de las coordenadas del avión respecto al terreno en cada momento del desarrollo del vuelo, con el fin de conducir automáticamente al vehículo a los puntos de exposición aérea, previamente establecidos en el planeamiento de vuelo.

Dentro de estos sistemas destacan los Siguietes:

- ④ **VLF/Omega:** El usuario introduce la posición exacta del avión en coordenadas geográficas antes del despegue y los sistemas calculan los movimientos X e Y relativos a partir del despegue, presentando al usuario la posición y velocidad con respecto a la tierra y los errores de trayectoria, incluyendo la deriva. Este sistema se basa en el principio de " *volar desde*".
- ④ **Doppler:** Basado en el radar Doppler y con el mismo principio que el anterior, este sistema controlado por el navegante mide la distancia y rumbo desde una posición de partida conocida.
- ④ **INS (Sistema de navegación inercial):** Basado también en el principio de " *volar desde*", este sistema hace uso de los cambios relativos de dirección medidos dentro del avión, para estimar las coordenadas X e Y desde un punto de partida conocido.

- ④ Otros sistemas a destacar son el **ANA** y el **I.T.C. (Photnav)**, los cuales tratan de compaginar los procedimientos de medición de distancia usuales para los trabajos topográficos de apoyo decampo y los instrumentos de control de las inclinaciones de los fotogramas. Los datos que suministran estos equipos, constituyen la base de datos para el cálculo electrónico de las coordenadas aéreas del avión y la corrección automática de su trayectoria aérea.
- ④ **GPS (Global Position System)**: en la actualidad es uno de los sistemas más utilizado en la realización de vuelos fotogramétrico, ya que permite obtener en modo cinemático posiciones en coordenadas X, Y, Z del orden del 0.5 m, permitiendo ser utilizado tanto en labores de navegación como en labores de obtención de ciertos elementos de la orientación externa, coordenadas de los centros de proyección (X0, Y0, Z0), permite la generación automática de los gráficos de vuelo.

3.2.10. CONDICIONES PARA LA TOMA DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS.

La toma de fotografías aéreas se realizará cuando la altitud del sol sea óptima, es decir, en aquel espacio de tiempo en el cual, los rayos solares presenten una inclinación tal que las sombras arrojadas por los accidentes sea mínima, por ello las limitaciones serán mayores en terreno accidentado.

No existe un criterio fijo para considerar la altitud solar mínima aceptable en el transcurso del año, pero suele adoptarse una altura mínima de 30° del sol sobre el horizonte y en regiones poco accidentadas puede llegarse a los 20°.

Cada región tendrá un periodo del año en el cual se cumplen estas condiciones. Así por ejemplo en España, en épocas comprendidas entre el 1 de Mayo y el 31 de Septiembre las tomas fotográficas se realizarán cuando la altitud del sol sobre el horizonte sea superior a 45°, pudiéndose considerar en el resto de los meses altitudes de 30°.

Los vuelos se realizarán con cielo despejado y cuando el terreno a fotografiar no tenga nieve, nieblas o brumas, que dificulten la claridad de los fotogramas.

3.2.11. RESULTADOS DIRECTOS DE LA TOMA FOTOGRÁFICA NEGATIVOS.

El soporte de la emulsión será de material indeformable (papel poliéster), debiendo revelarse inmediatamente después del vuelo, para proceder a una repetición eventual.

Se revisará la calidad de la imagen así como los recubrimientos, eliminándose los fotogramas malos, volviendo a repetir el vuelo en las zonas afectadas.

La información complementaria que debe aparecer en los márgenes del mapa de vuelo son: zona de vuelo, escala, número de pasada y de fotograma, fecha de obtención y hora, nivel indicativo de verticalidad, así como las características de la cámara empleada (número, distancia principal calibrada, marcas fiduciales).

🌐 **Copias por contacto y contratipos:**

Suelen realizarse copias contratipos de seguridad y diapositivas para la restitución. Se realizará también copias en papel por contacto.

🌐 **Gráficos de vuelo:**

Sobre la cartografía existente de la zona (*generalmente sobre el MTN 1:50000 y 1:25000*).

Se dibujan las posiciones relativas de cada una de las fotografías, figurando los ejes de las pasadas y los recuadros de los fotogramas, con la numeración correspondiente.

Los ejes de las pasadas, se representarán uniendo los puntos principales de los fotogramas, cuyo número dentro de la pasada sea múltiplo de 5 (enlace cada 5 fotogramas).

3.2.12. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.

En los Sigüientes apartados se expone de manera resumida un Pliego de Condiciones Técnicas Generales para Vuelos Fotogramétricos.

1. Condiciones para optar a la contratación.

Documentación prevista en la Ley de Contratos del Estado y demás disposiciones de Aplicación.

2. Condiciones generales del trabajo.

2.1. Zonas y superficies.

- 2.2. Escala de imagen.
- 2.3. Tipo de objetivo.
- 2.4. Tipo de fotografía.
- 2.5. Precio tipo e importe.
- 2.6. Plazo de ejecución.

3. Cámara y equipo asociado.

- 3.1. Cámara métrica. Formato del fotograma y distorsiones radiales residuos máximas.
- 3.2. Calibrado. Certificado valido por un periodo de tiempo.
- 3.3. Filtros.
- 3.4. Ventanas para la cámara.
- 3.5. Montaje de la cámara.

4. Cobertura fotográfica y vuelo.

- 4.1. Cobertura fotográfica.
- 4.2. Altura de vuelo. Variación entre el + 2% y el - 5%.
- 4.3. Dirección de las bandas.
- 4.4. Recubrimientos. Longitudinal entre el 55% y el 65%, transversal entre el 20% y el 25%.
- 4.5. Interrupción de pasadas.
- 4.6. Rectitud de pasadas.
- 4.7. Verticalidad de los fotogramas.
- 4.8. Condiciones fotográficas.

5. Material fotográfico.

- 5.1. Película.
- 5.2. Exposición y procesado.

6. Documentación a entregar.

- a. Película negativa original.
- b. Colección de positivas contacto en papel.
- c. Original y dos copias de cada uno de los Siguietes gráficos:
 - Esquema de los puntos principales de todas las fotografías.
 - Esquema de la disposición de las fotografías individuales.
- d. Copia del último certificado de calibración.
- 6.1. Anotaciones en los rollos negativos.
- 6.2. Información sobre los negativos.
- 6.3. Colección de copias positivos en papel estable.
- 6.4. Esquema o gráficos de vuelo.
 - 6.4.1. Gráfico de puntos principales.
 - 6.4.2. Gráfico de fotogramas.

CAPÍTULO 4.

CONTROL TERRESTRE. (PUNTOS DE APOYO)

4.1 INTRODUCCIÓN.

En la fase de orientación absoluta se necesita conocer las coordenadas terrestre de una serie de puntos del fotograma, para poder ajustar la escala del modelo estereoscópico y realizar la nivelación de éste. El número mínimo de puntos para poder efectuar esta operación es de tres, dos puntos en X, Y, Z (Planimétrico-Altimétrico) para poder llevar a cabo el ajuste de la escala del modelo y un tercero en Z (Altimétrico) de manera que sumados a los dos anteriores, hacen un total de tres puntos de coordenadas altimétricas conocidas, para poder efectuar la nivelación del modelo. La determinación de las coordenadas planimétricas (control horizontal) y altimétrica (control vertical) de estos puntos se conoce con el nombre de apoyo de campo. La realización de los trabajos topográficos y geodésicos que lleva consigo la fotogrametría, es necesario utilizar unos métodos y unos instrumentos que agilicen al máximo el levantamiento de los puntos de control.

La determinación de los puntos de apoyo puede realizarse:

- ☉ Utilizando procedimientos clásicos de la topografía, pudiéndose dividir los trabajos a realizaren dos fases:
 1. Obtención de una red básica por medio de triangulaciones, trilateraciones, intersecciones o Poligonales de precisión. Esta red básica irá enlazada a la red geodésica para permitir conocer las Coordenadas absolutas.
 2. Red de Apoyo fotogramétrico, constituida por puntos determinados por mediciones que se Apoyan en la red anterior.
- ☉ Utilización de *GPS*. Estos aparatos agilizan mucho la toma de datos en campo, ya que no están condicionados a las observaciones clásicas de los instrumentos topográficos (Figura 4. 3)³¹.

A la hora de efectuar estos trabajos, es de vital importancia la existencia de redes geodésicas, así como su densidad y el estado de materialización en el terreno. En aquellas zonas donde estas redes son escasas o no existen, incrementan los trabajos de control terrestre, así como en zonas con una gran vegetación y terreno accidentado.

³¹ Fuente. http://www.asifunciona.com/electronica/af_gps/af_gps_10.htm

4.1.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO FOTOGRAMÉTRICOS.

Anteriormente se ha hecho mención del número mínimo teórico de puntos de apoyo en un par, Pudiéndose añadir otros para tener un control del modelo. Podemos adoptar la distribución de la (Figura 4. 1 y Figura 4. 2), donde aparecen conjuntamente ciertos puntos que son a la vez planimétricos y altimétrico; Cuatro puntos con coordenadas X, Y, Z (planimétricos-altimétricos) teniendo, dos puntos de control para la puesta en escala del modelo, el quinto punto de coordenada Z (altimétrica), nos daría, unido a los cuatro anteriores un total de cinco puntos altimétricos, resultando dos de control, permitiendo de este modo verificar los basculamientos del modelo y las deformaciones de la imagen, por medio del punto central.

La distribución de los puntos de apoyo en las esquinas del modelo, viene condicionada por el hecho de que estos deben servir de apoyo para la pasada superior e inferior, e igualmente para los fotogramas antecedente y precedente, con el fin de obtener el mínimo de puntos precisos de control terrestre.

Además del criterio de economía, existen razones de precisión, ya que al efectuar la restitución, resulta arriesgado realizarla fuera de los límites que encierra el cuadrilátero que une estos puntos.

También puede decirse en favor a esta distribución, el poder contar con las máximas distancias para dar escala al modelo y para corregir las inclinaciones longitudinales y transversales de la fase de orientación absoluta. No obstante esta distribución no siempre es posible.

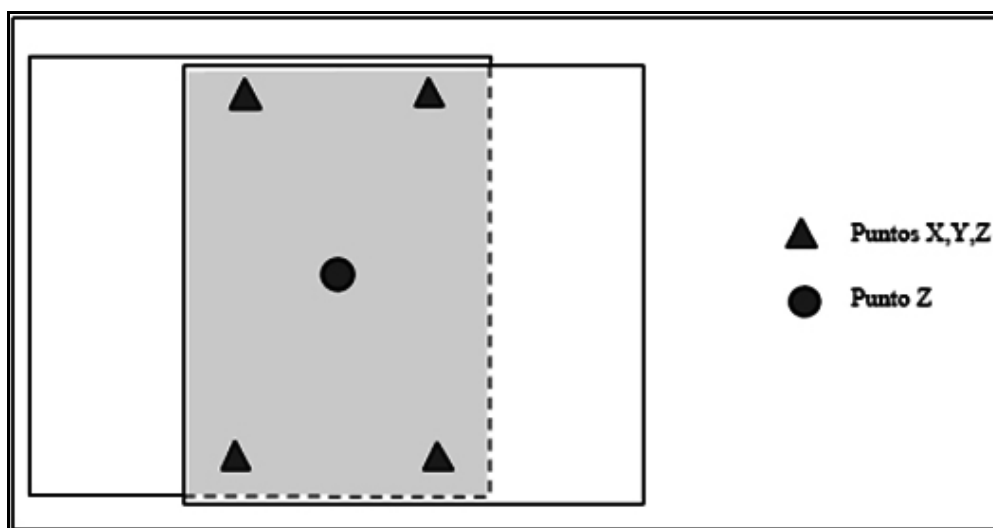


Figura 4. 1. Distribución de los puntos de control terrestre

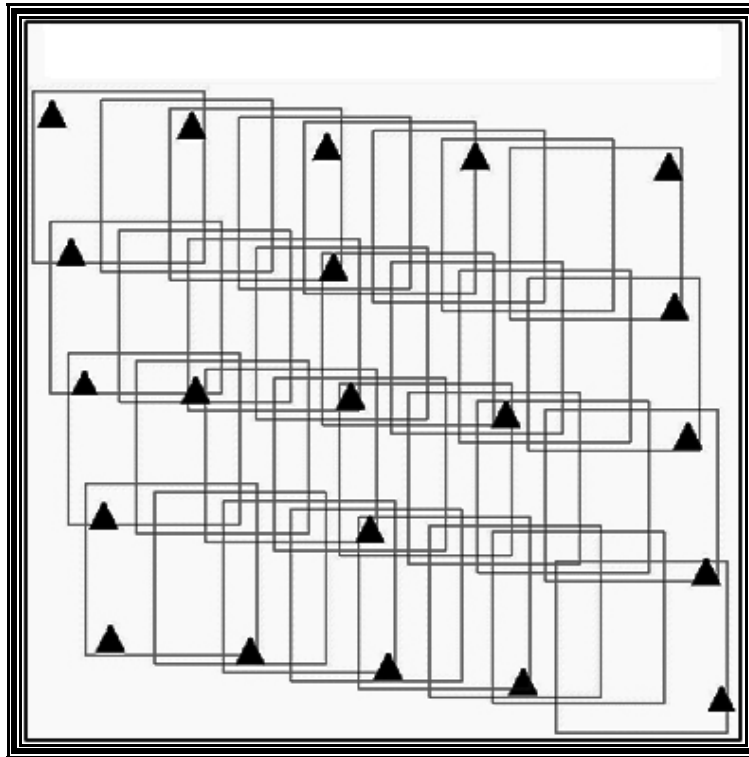


Figura 4. 2. Control a lo largo de todos los bordes del bloque y después de la 3ra foto de cada línea

4.1.2. ELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO FOTOGRAMÉTRICOS.

Se realiza de forma aproximada en gabinete, donde con ayuda de la cartografía existente y los fotogramas del vuelo, se van examinando los entornos donde pueden elegirse en campo.

La elección de los P.A. debe responder a los Siguietes criterios:

- ④ El detalle Planimétrico deberá ser perfectamente identificable en todos los fotogramas.
- ④ Los puntos se elegirán dentro de la zona marcada en gabinete, con la finalidad de que cumplan los requisitos para la realización de la orientación absoluta del modelo.
- ④ Si es posible, los puntos quedarán definidos por alineaciones rectas, tales como esquinas de Corrales, esquinas de casas, cruces de caminos.....etc. También se elegirán detalles naturales.
- ④ Preferentemente serán un detalle artificial y estable.

- ④ Los puntos altimétricos será conveniente escogerlos sobre partes del terreno de muy débil Pendiente (lo más horizontal posible), evitando en lo posible los detalles que se presten a una mala puntería estereoscópica (playas brillantes, arenas.....etc.).
- ④ Los puntos de apoyo se pinchan en todos los fotogramas y se marcan en la fotografía por medio de un círculo, teniendo como centro el pinchazo de identificación y un número de serie.

4.1.3. PRE SEÑALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYOS.

En planos a escalas grandes, destinados principalmente a la ingeniería es necesario tener en cuenta, a la hora de realizar la planificación del levantamiento, la fase de replanteo del proyecto.

Proyectada la obra, deberá contarse con los suficientes elementos que aseguren plasmar en el terreno el diseño realizado. Estos requerimientos difícilmente nos lo encontraremos en la naturaleza, y aunque la zona objeto del estudio ofrezca gran cantidad de detalles artificiales, muy pocos consiguen ser útiles para emplearse con dicho fin.

La manera de salvar estos inconvenientes es mediante la pre señalización, consistiendo esta en la materialización en campo de una serie de señales, previamente a la realización del vuelo, distribuidas según una densidad y forma, para poderlas utilizar como puntos de apoyo fotogramétricos.

La forma de estas señales adoptada más generalmente es la cuadrada, en las que el material utilizado es de aluminio, contrachapado o cartón. Las dimensiones de estas señales variarán con la escala de la fotografía.

- Para escalas pequeñas ($\approx 1:18000$) 75 x 75 cm.
- Escalas medias ($\approx 1:7500$) 30 x 30 cm.
- Escalas grandes ($\approx 1:3000$) 15 x 15 cm.

Otra forma adoptada en algunos organismos es la circular, constituida por círculos blancos trazados con cal sobre el suelo, previamente limpio, pudiéndose mejorar sustituyendo los círculos por cruces (Figura 4. 4)³².

³² Cortesía de sistemas de información geográfica

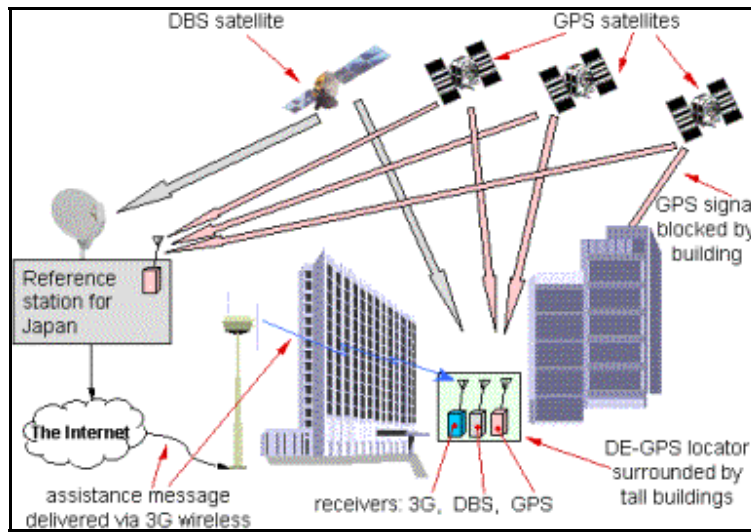


Figura 4. 3. Los GPS se ocupan en apoyo terrestre.



Figura 4. 4. Puntos tomados por poyo terrestre

CAPÍTULO 5.

LA AEROTRIANGULACIÓN.

5.1 INTRODUCCIÓN

La aerotriangulación³³ tiene por objeto obtener las coordenadas de diversos puntos del terreno mediante los procedimientos de la fotogrametría.

Fue concebida para efectuar los levantamientos topográficos por medio de la fotografía, reduciendo al mínimo los trabajos a realizar en campo. Necesita no obstante, apoyarse sobre puntos de posición conocida en el terreno y que tendrán que determinarse en campo por métodos geodésicos y topográficos.

El objetivo de la aerotriangulación es obtener la posición del mayor número posible de estos puntos de apoyos mediante operaciones fotogramétricas de gabinete, reduciendo por tanto los trabajos a realizar en campo.

Dentro del conjunto de tareas que conllevan las ejecuciones cartográficas por procedimientos fotogramétricos se encuentra la fase de orientación absoluta, consistente en dar escala y nivelar el modelo estereoscópico a partir de una serie de puntos de posición conocida.

Para grandes proyectos, el número de puntos de control (puntos de apoyo) necesarios es enorme, y el coste de realización puede ser extremadamente alto si es realizado exclusivamente por métodos de medición en campo.

Muchos de estos puntos de control necesarios se establecen rutinariamente por aerotriangulación desde una escasa conexión de control terrestre de trabajos de campo y unos sustanciales ahorros en coste.

Una más reciente innovación reside en el uso del GPS cinemático en el avión para proveer de coordenadas a la cámara en el momento de cada exposición.

En teoría este método de control de GPS puede eliminar lo necesario para el control terrestre, aunque en la práctica, una pequeña cantidad de control terrestre se usa todavía para fortalecer la solución.

Además de tener una ventaja económica sobre las mediciones en campo, la

³³ Aerotriangulación, también conocida con el nombre de triangulación aérea o fototriangulación. Este último término es quizás más general, ya que el procedimiento puede ser aplicado tanto a fotos aéreas como terrestres.

aerotriangulación aporta otros beneficios:

- 🌐 La mayor parte del trabajo se hace en gabinete, minimizando retrasos por condiciones adversas.
- 🌐 No hay que acceder demasiado al área del proyecto.
- 🌐 Se reduce mucho el trabajo de campo en áreas difíciles.
- 🌐 El ahorro del trabajo de campo necesario para formar los puentes se verifica durante el proceso de aerotriangulación y como consecuencia de esto crea posibilidades de control de valores erróneos para después en la iniciación de la formación ser minimizados y usualmente eliminados.

Esta última ventaja es tan Significativa que algunas organizaciones llevan a cabo La formación de puentes aunque exista un control adecuado de medidas en campo. Es por esta razón que algunas especificaciones para proyectos de mapas requieren el uso del establecimiento de control fotográfico.

La idea surgió hacia 1940, fecha en la que haciendo mediciones sobre dos fotografías se calculaban puntos de un modelo (aerotriangulación de un bloque de un único modelo).

Posteriormente y mediante empalme de varios modelos consecutivos de una misma pasada se obtenía a la vez la orientación absoluta de todos los modelos y las coordenadas de los puntos en cada uno de los modelos; el empalme se realizaba por los puntos comunes entre dos modelos consecutivos.

Obtenidas varias fajas consecutivas podía establecerse una compensación. El método se denominó *Aeroplignación*.

Debido fundamentalmente a la escasez de medios de cálculo era preferible reducir el tiempo de procesamiento de los datos (compensación) aumentando el tiempo de medición usando fotogramas con una escala menor, aparatos de muy alta precisión de medida, realizando el mínimo calculo posible. (Figura 5. 1) ³⁴

Los aparatos usados hasta entonces fueron de primer orden, muy estable, sólido y preciso, provisto de paralelogramo de Zeiss y mecanismos ópticos de inversión de imágenes para el empalme de modelos de una misma pasada, los cuales resultaban muy caros.(Figura 5. 2) ³⁵

³⁴ Fuente <http://nl.wikipedia.org/wiki/Restitutietoestel>

³⁵ Fuente. Instrumento fotogramétrico universal "estereoplanógrafo ZEISS C-8" de primer orden, utilizado en el periodo 1954-1980.Imagen tomada de la web
Fuente: http://www.sedena.gob.mx/imagenes/historia/cartografia/cart_eje/zeiss_c8.jpg

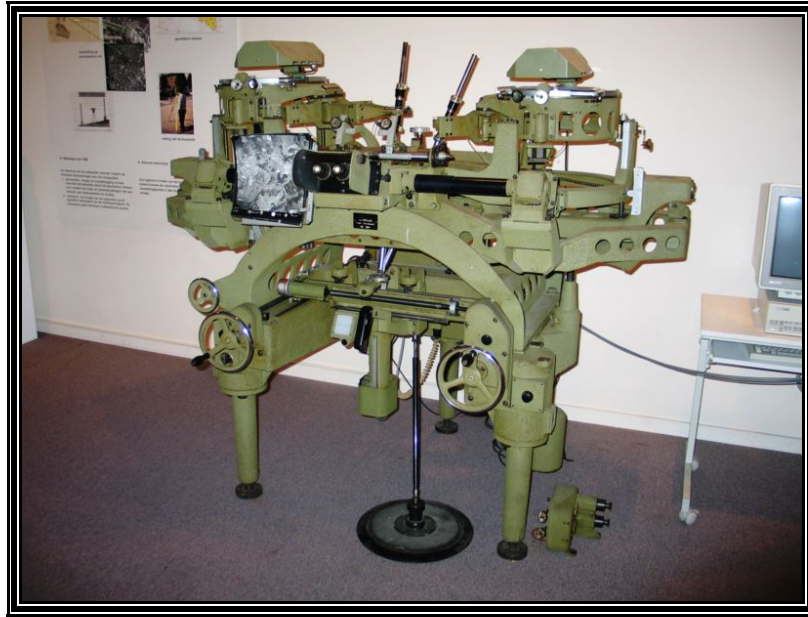


Figura 5. 1. Wild -a7



Figura 5. 2. ZEISS C-8

A partir de 1960 el aparato de cálculo estuvo dispuesto, con suficiente velocidad de operación, dejando paso a otros tipos diferentes de compensación, como son el método de haces de rayos y el de los modelos independientes.

En aerotriangulación es común denominar a los puntos determinados en campo (apoyo de campo), como puntos de control.

A los puntos que se determinan mediante aerotriangulación se denominan puntos

enlace y paso. Algunas veces, podremos encontrarnos con las denominaciones de puntos de control mayores y menores, haciendo referencia los primeros al apoyo en campo y los segundos a los puntos obtenidos por aerotriangulación.

Se llaman *pasadas (bandas o fajas)* al conjunto de fotografías efectuadas por el avión en la dirección del vuelo.

Con el nombre de *bloque* entenderemos el conjunto de fotografías o modelos que componen el vuelo fotogramétrico que recubre una determinada zona objeto de nuestro trabajo. Como *punteo* al conjunto de fotografías, parte por lo general de una pasada y/o bloques de fotos, con puntos de control (apoyo) en ambos extremos, y que va a ser objeto del proceso de aerotriangulación.

5.2. FASES DE QUE CONSTA EL PROCESO DE AEROTRIANGULACIÓN.

En el proceso de aerotriangulación se pueden diferenciar tres fases según la función a realizar:

- ④ Fase de preparación.
- ④ Fase de medición o captura instrumental de datos.
- ④ Fase de procesamiento de datos (transformaciones y ajustes de coordenadas en el ordenador).

5.2.1. FASE DE PREPARACIÓN.

En esta fase se pueden diferenciar tres apartados:

- ④ Recepción del material.
- ④ Elección, numeración y señalización de los puntos de control menores (puntos de apoyo complementarios – *Puntos de paso y enlace* –).
- ④ Preparación de un mapa índice de modelos o esquema general de los canevas de puntos.

5.2.1.1. RECEPCIÓN DEL MATERIAL.

Los trabajos de aerotriangulación comienzan cuando se recibe la colección de fotogramas del bloque y la documentación relativa a los puntos de apoyo de campo que vamos a utilizar como soporte de los cálculos.

Las personas encargadas de estos trabajos entregarán:

- ④ La colección de negativos del vuelo de la zona.
- ④ Una colección de contactos en papel de los negativos donde figuren los puntos de apoyo numerados y pinchados.
- ④ Cuadernos de campo, listado de coordenadas de los puntos, croquis y reseñas de estos.
- ④ Esquemas de la distribución del apoyo respecto del canevas general del vuelo en el que estén reflejadas las pasadas de con las fotografías.

Se deberá comprobar que la posición de los puntos de apoyo de campo es la más adecuada para el método y los programas de cálculo y ajuste que vayamos a usar en la fase del procesamiento de datos.

El número y distribución de puntos de control (apoyo) del aerotriangulación que se esté empleando. Con métodos de compensación rigurosos podemos establecer las necesidades de control de un bloque de cualquier tamaño y forma son:

- ④ **Control Planimétrico:** puntos de control distribuidos en el perímetro del bloque, y separados una distancia que se expresa en número de modelos o longitudes de base, que depende de la precisión planimétrica que queramos alcanzar. A esta distancia entre puntos de control se le denomina distancia puente. El valor medio de esta distancia puente se puede cifrar en 4 modelos (un punto de control situado en el perímetro cada cuatro modelos) (Figura 5. 3).
- ④ **Control altimétrico:** cadenas completas de puntos de control a través de bloque. Los puntos de control a lo largo de una cadena son convenientes situarlos en las zonas de traslape transversal entre pasadas. La separación de estas cadenas depende de la precisión altimétrica que queramos alcanzar. Un valor medio de distancia puente entre las cadenas de puntos puede ser de 4 modelos (un punto de control altimétrico cada cuatro modelos) (Figura 5. 4).

Lo normal es situar cadenas de puntos planimétricos-altimétricos, cada cuatro modelos.

La influencia de la distancia puente en la precisión final de las coordenadas ajustadas se estudiará en el apartado referente al análisis de precisiones.

El empleo de la aerotriangulación no solo reduce el número de puntos de control necesarios, con respecto al apoyo de campo completo, sino también flexibiliza su distribución, ya que no tenemos la limitación de situar forzosamente el punto de control en la zona común de recubrimiento para varios modelos y pasadas. Y además el diseño de las cadenas de puntos a lo largo del bloque puede ser variado para evitar zonas de dificultad topográfica.

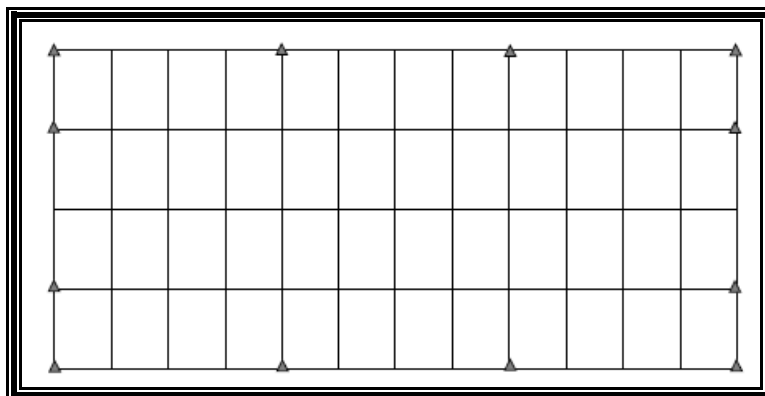


Figura 5. 3. Puntos de control Planimétrico.

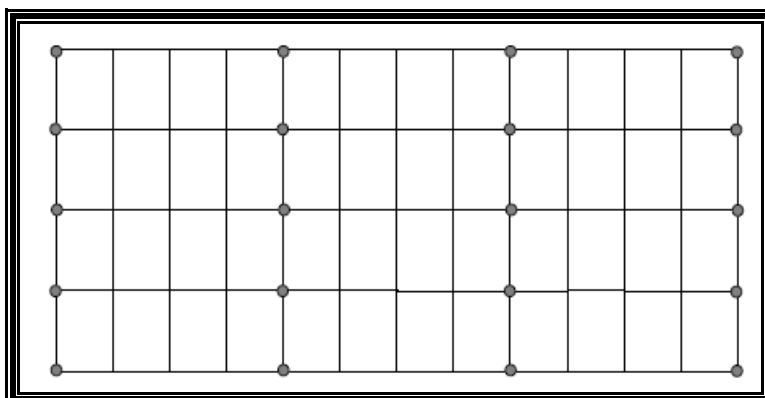


Figura 5. 4. Puntos de control altimétrico.

5.2.1.2. ELECCIÓN, NUMERACIÓN Y SEÑALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL MENORES.

En esta fase se procederá a elegir los puntos complementarios (paso y enlace) de forma que unan todas las fotografías o modelos de un bloque en sentido longitudinal a lo largo de la pasada y transversal entre pasadas. De estos puntos a priori no conocemos sus coordenadas, precisamente se van a determinar mediante la aerotriangulación y serán los que se utilicen posteriormente en la fase de orientación absoluta.

- Puntos de paso.** Tienen un doble propósito, en aerotriangulación se usarán para enlazar modelos individuales para la formación de la pasada y durante la fase de restitución servirán para realizar la orientación absoluta de los modelos. Estos puntos se eligen en la zona de recubrimiento común entre dos modelos, es decir, deberán aparecer en tres fotografías sucesivas de una pasada. Se situarán dos puntos en los extremos (centro del recubrimiento longitudinal de pasadas adyacentes) y el tercero en el centro (Figura 5. 8 y Figura 5. 9)
- Puntos de enlace.** El propósito de estos es conectar una pasada a la adyacente del bloque. Se sitúan en el centro de recubrimiento transversal común entre dos pasadas. Usualmente se utiliza el mismo punto para unir modelos sucesivos y pasadas adyacentes.

Se empieza por dibujar en los contactos de papel las zonas de traslape entre fotogramas adyacentes para determinar los entornos dónde se van a situar los puntos. En el interior de las zonas comunes y en el centro se señalará, en la fotografía central de cada tema una pequeñas área circular de 1 cm de diámetro aproximadamente, dónde se situarán los puntos y a continuación se numeran de forma sencilla o Siguiendo un cierto código que nos indique la situación del punto dentro del bloque, de tal forma que no coincida con el resto de puntos que intervienen en la aerotriangulación. Una forma usual de numerar estos puntos, es la de asignarle el número de la fotografía añadiéndole un código. A los centros de proyección suelen asignárseles el número de fotografía (Figura 5. 5).

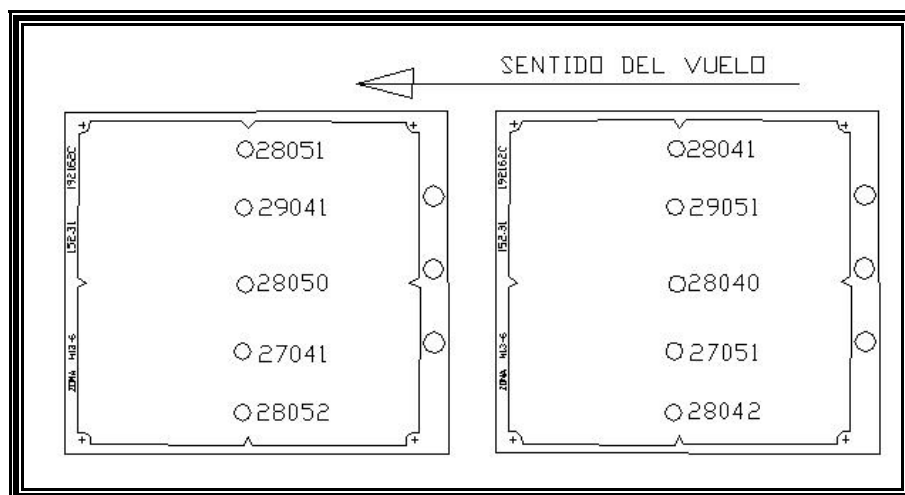


Figura 5. 5. Numeración de puntos

Otro sistema de numeración de puntos que permite identificar fácilmente la función del punto y la posición que ocupa tanto en el fotograma como en el bloque es la siguiente fotografía (Figura 5. 6):

- ④ Los puntos de apoyo mantienen la numeración seguida en los trabajos topográficos-geodésicos.
- ④ El resto de puntos (excepto los centros de proyección, que vendrán numerados con el número de fotograma) disponen de una numeración que consta de 6 dígitos, cuyas características son:
 - El primer y segundo dígito describen conjuntamente la posición del punto en la pasada. La numeración de los dígitos va de izquierda a derecha.
 - El primer dígito es igual al número de la pasada.
 - Si el punto se sitúa en la zona de recubrimiento entre pasadas y además se utiliza como punto de paso entre las mismas, entonces el segundo dígito indicará el valor de la segunda pasada; en caso contrario, el segundo dígito será igual a 0.
 - El tercer dígito describe la tarea asignada al punto medido en la formación del bloque. Así pues, tendremos que si se utiliza para:

➤ Orientación relativa (o.r.)	Su valor es 1.
➤ Conexión de modelos (c.d.m.)	“ 2.
➤ Conexión de pasadas (c.d.p.)	“ 3.
➤ o. r. y c. d. m.	“ 5.
➤ c.d.m. y c.d.p.	“ 6.
➤ o.r. y c.d.p.	“ 7.
➤ o.r. y c.d.m. y c.d.p.	“ 8.

Los tres últimos dígitos definen el número del punto en la pasada. Generalmente en cada pasada se adopta un intervalo (prefijado de antemano) múltiplo de una cantidad constante. Por ejemplo:

En la primera pasada, los puntos se podrían numerar desde el 001 al 100; en la segunda, desde el 101 al 200, etc.

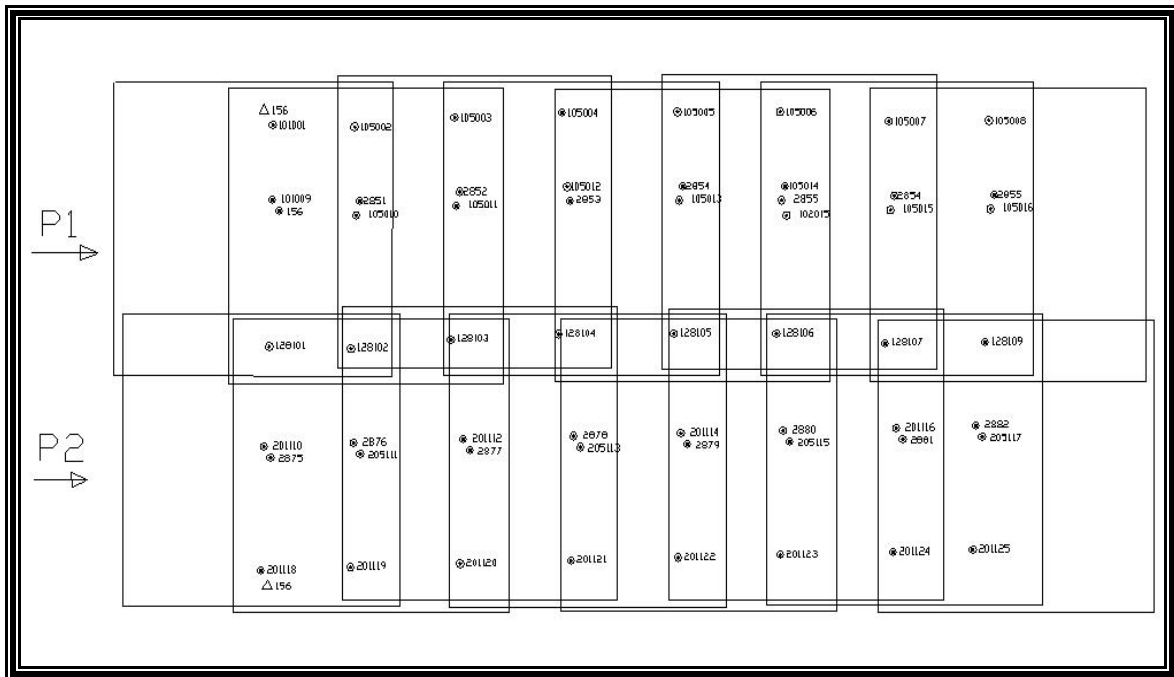


Figura 5. 6. Bloque de Imágenes Enumeradas

Toda esta operación se realiza con ayuda de un estereoscopio, para comprobar que las zonas elegidas para los puntos de enlace son sensiblemente llanas y sin vegetación, para que durante la fase de medición el operador pueda situar la marca flotante sobre el terreno con precisión.

La siguiente operación consiste en marcar en la emulsión de las diapositivas o negativos originales los puntos de paso y enlace, transfiriendo los puntos superior e inferior a las pasadas adyacentes, en caso de que actúen de enlaces de pasadas. Esta señalización se realiza con los instrumentos adecuados (transferidores y marcadores Figura 5. 7)³⁶.

Esta transferencia de puntos es una de las operaciones más delicadas de la triangulación, ya que de su perfecta ejecución depende la precisión en la formación del bloque.

Su realización se hace observando estereoscópicamente los fotogramas de las pasadas, por medio de estos instrumentos (transferidores y marcadores), actuando los elementos de marcado como “marca flotante”.

³⁶ Fuente. http://www.leica-geosystems.com/uk/en/reporter40_sp.pdf

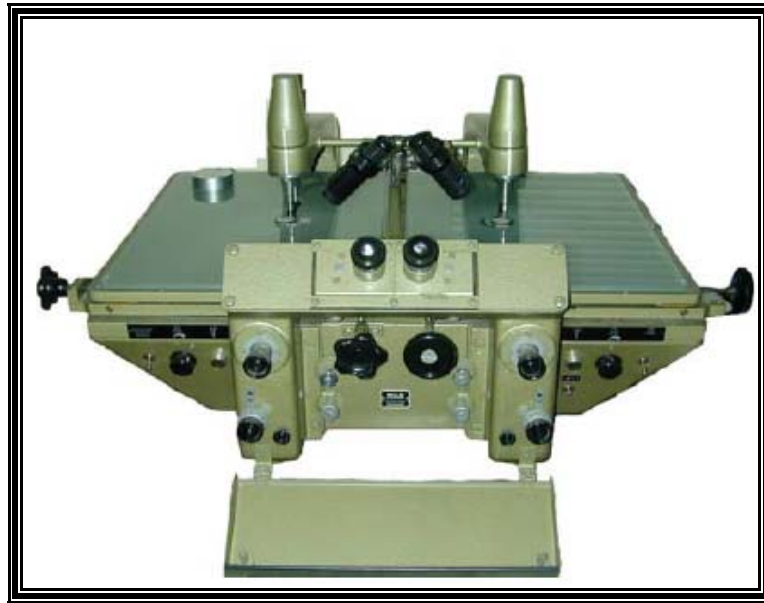


Figura 5. 7. Transferidor de puntos, Wild PUG-4.

Con este instrumento se sitúan un par estereoscópico de diapositivas en las placas. Las diapositivas se observan estereoscópicamente a través de un binocular. Mediante medidas de los tornillos de movimiento lento, las diapositivas pueden ser ajustadas superficialmente en las direcciones x e y hasta que la marca flotante, construida por dos medias marcas, aparezca posada exactamente en el punto a marcar. La marca se establece sobre la emulsión fotográfica, y puede ser realizada por percusión, ignición por rayo láser o mediante rotor que levante la emulsión.

A esta marca se le conoce como pinchazo y a la operación como pinchar las diapositivas. Conviene distinguir este pinchazo sobre la diapositiva con el pinchazo realizado sobre el contacto en la fase de apoyo de campo.

Con los puntos marcados por el transferidor de puntos, se realizan pequeños agujeros sobre los cuales la emulsión ha quedado destruida. Por consiguiente el refinamiento en la identificación de la posición de la imagen se puede hacer y no se fija ningún error en posicionamiento.

Esta operación se debe hacer con extrema precaución.

Alrededor de cada marca se dibuja un círculo para facilitar la localización del punto. Cada diapositiva irá provista de tres puntos pinchados en la sección central (uno en la parte superior, otro en el centro y otro en el extremo inferior).

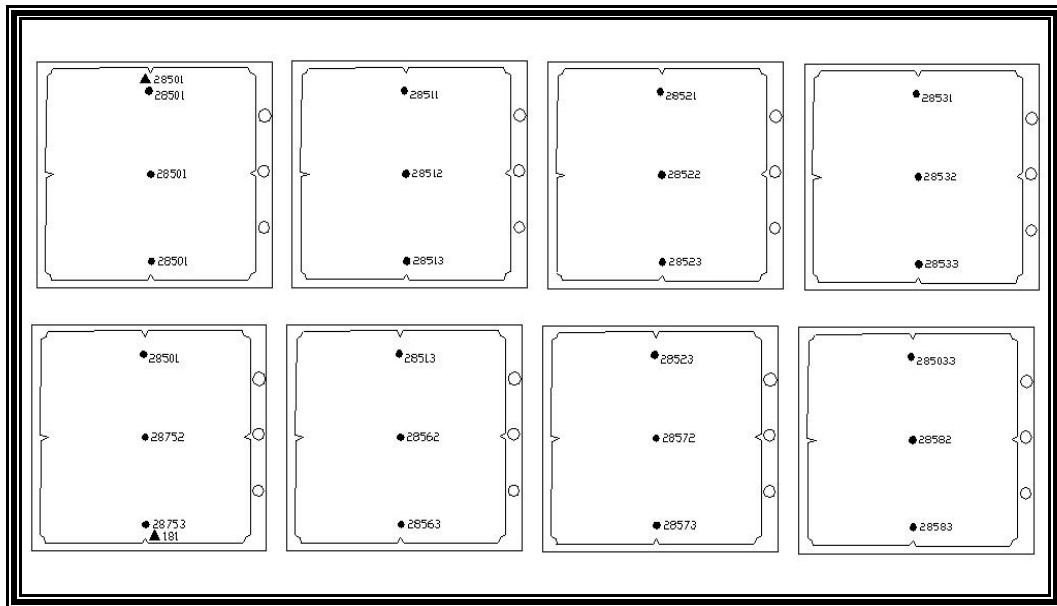


Figura 5. 8. Señalización de los puntos en cada imagen

Cuando se hacen mediciones de puntos en aerotriangulación observándose las fotografías en modo estereoscópico con estereocomparador, solamente se marcan tres puntos de paso cerca del eje y de cada foto (Figura 5. 8).

Los estereocomparadores miden simultáneamente fotocoordenadas de puntos correspondientes a diapositivas de un par estereoscópico.

Durante la observación a través de los binoculares, las posiciones de las diapositivas se ajustan hasta que la marca flotante se pose sobre el punto deseado exactamente. En esta posición las medidas se registran para ambas fotografías.

Cuando tenemos pares estereoscópicos de fotos con puntos de paso marcados igual que en la Figura 5. 10 se orientan en un restituidor, seis puntos aparecen en cada modelo como muestra la Figura 5. 9

El operador verá una escena ligeramente confusa. Mientras el área circundante por los puntos de paso se verá estereoscópicamente, el agujero perforado aparecerá solamente en el ocular derecho o izquierdo pero no en ambos. Con práctica, un operador puede colocar con precisión la marca flotante en el lugar deseado de la imagen. Una vez que la marca flotante está situada el lugar deseado, se miden las fotocoordenadas x e y de las mitades de marca derecha e izquierda.

En el caso de usar en aerotriangulación analítica un monocomparador, es necesario ver las imágenes de todos los puntos de paso en cada fotografía. En los puntos de paso marcados artificialmente para medidas en monocomparador,

algunos puntos tales como 28511, 28512 y 28513 de la Figura 5. 10 aparecen en tres fotos sucesivas. Cada uno de esos puntos puede estar localizado arbitrariamente en una fotografía, normalmente en el centro de la misma sobre la cual aparecen; pero una vez marcados, deben ser cuidadosamente transferidos a sus correspondientes situaciones en las dos placas adyacentes.

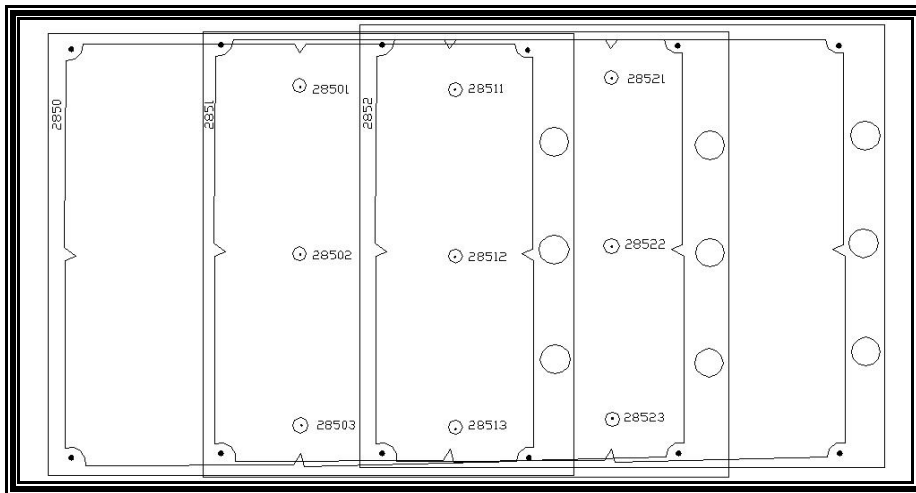


Figura 5. 9. Localización de puntos en dos modelos adyacentes.

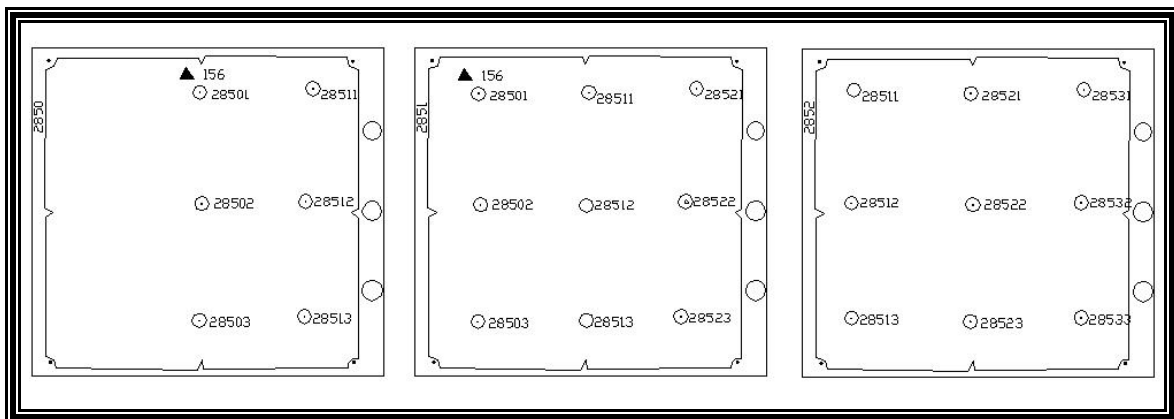


Figura 5. 10. Señalización de los puntos en cada imagen

En aerotriangulación digital la selección de puntos de paso se realiza automática mediante tratamiento de imágenes digitales, que es el paso esencial de un proceso comúnmente denominado aerotriangulación automática. En este método los puntos se seleccionan en las áreas de recubrimiento de las imágenes digitales y automáticamente se hacen coincidir entre imágenes adyacentes, por tanto se consigue simultáneamente la selección de los puntos de paso y la medición de las fotocoordenadas. Este método requiere una pequeña intervención del operador y es por tanto un proceso muy económico. Un beneficio añadido es que se pueden generar un gran número de puntos de paso con un mínimo esfuerzo, lo cual añade redundancia y refuerza la solución de la aerotriangulación.

5.2.1.3. PREPARACIÓN DEL MAPA ÍNDICE DE MODELOS O CANEVÁS GENERAL.

Es conveniente para la organización de los trabajos, tanto de aerotriangulación como de restitución, disponer de un gráfico general con la distribución de todos los modelos del bloque en el que se incluyan tanto los puntos de apoyo terrestre como los fotogramétricos debidamente numerados. Este gráfico se puede hacer manualmente, antes o durante proceso de captura, a una escala aproximada o en un plotter automático una vez finalizado el ajuste (Figura 5. 11))

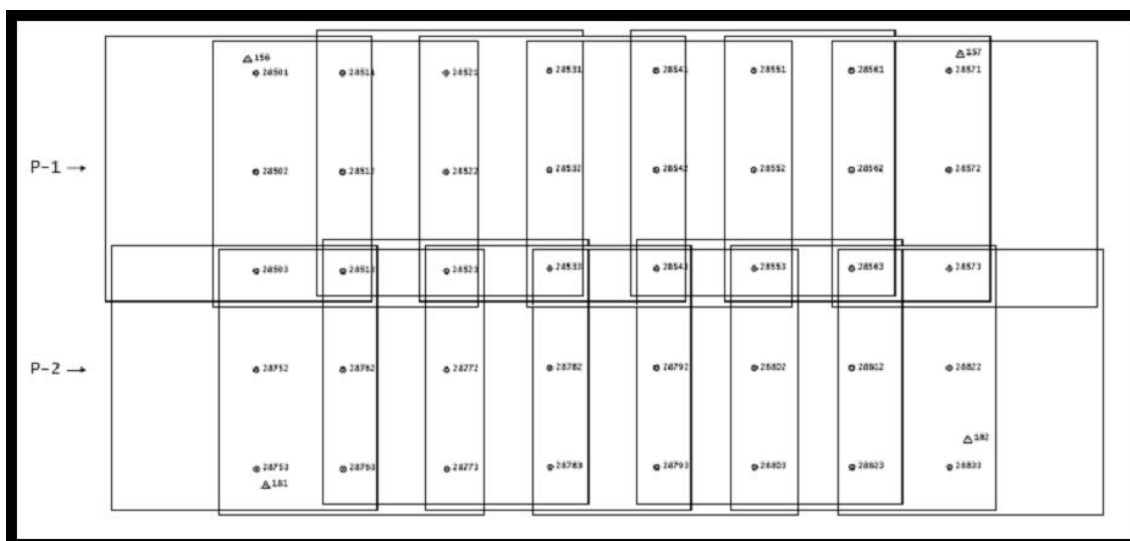


Figura 5. 11. Mapa General del bloque fotogramétrico (mapa índice).

5.2.2. FASE DE CAPTURA INSTRUMENTAL DE DATOS.

El proceso varía según el método de aerotriangulación empleado, pero en esencia consiste en colocar los pares estereoscópicos en el instrumento de medición y tomar los datos necesarios para su posterior procesamiento. El instrumento y los programas disponibles nos condicionan las operaciones a realizar. Así, podemos formar la pasada en la fase instrumental por el método de Aeroplignación o esta fase puede terminar con la medición de fotocoordenadas en el método analítico. En el primer caso, la orientación externa tiene lugar en el instrumento y, en el segundo, esta operación se realiza en el ordenador, resolviendo matemáticamente la relación entre las coordenadas de la imagen fotográfica medidas en el sistema tridimensional de coordenadas terreno o modelo. Pero ambos métodos tienen en común la medición de coordenadas de todos los puntos (de campo o puramente fotogramétricos), sea en el modelo o en la diapositiva, directamente por medio de los índices de medición que, gobernados por manivelas y pedales u otros dispositivos, se van posando en los puntos previamente seleccionados.

5.2.3. FASE DE PROCESAMIENTO DE DATOS.

Las observaciones obtenidas en la fase instrumental (medición), conjuntamente con las coordenadas terreno de los puntos de control constituyen los datos de entrada para el cálculo y ajuste del bloque. El resultado será la relación de coordenadas ajustadas y las discrepancias obtenidas en los puntos de control y en los puntos de paso y enlace internamente.

También esta fase está condicionada por el método de aerotriangulación que se utilice, así pueden presentarse los casos Sigüientes:

- 🌐 En el caso de aerotriangulación por *Pasadas o Aeroplignación*:
 1. Transformación y ajuste de las pasadas.
 2. Formación del bloque.
 3. Ajuste del bloque.

- 🌐 En el caso del método de **Modelos Independientes**, pueden seguirse dos caminos:
 - ⊕ Formación analítica de las pasadas (transformaciones 3D de los modelos de La pasada).
 - ⊕ Formación analítica del bloque (unión de todas las pasadas).
 - ⊕ Ajuste del bloque.
 - ⊕ Formación analítica del bloque (transformación 3D de todos los modelos Del bloque a la vez).
 - ⊕ Ajuste del bloque.

- 🌐 En el caso **Analítico**, se pueden seguir dos vías una secuencial y otra simultánea:

Secuencial

- ⊕ Formación analítica de los modelos.
- ⊕ Formación analítica de las pasadas.
- ⊕ Formación analítica del bloque.
- ⊕ Ajuste del bloque

Simultáneo

- ⊕ Formación analítico del bloque (transformación 3D de todos los modelos Del bloque a la vez).
- ⊕ Ajuste del bloque.

Para todos los casos se hará una comprobación final de los modelos al terminar el ajuste. Para el ajuste de un bloque fotogramétrico, tres son los métodos analíticos utilizados: el método secuencial, el método de modelos independientes y el método de ajustes simultáneos. Los dos primeros son lógicas extensiones al dominio de la Fotogrametría analítica de la aerotriangulación practicada con instrumentos analógicos (restituidores). Sus principales características son las Sigüientes:

🌐 **Método secuencial:** en este método, desarrollado a finales de los años cincuenta por National Council Research (NCR) y el British Ordnance Survey (BOS), las etapas fundamentales son:

- ⊕ Formación de pasadas con respecto a un sistema de coordenadas rectangular arbitraria (orientación relativa).
- ⊕ Transformación de las coordenadas modelo al sistema terrestre de referencia respecto del cual se conoce la posición de los puntos de control (orientación absoluta).

Suponiendo una orientación arbitraria para la primera fotografía de la pasada fotogramétrica, la primera etapa consiste esencialmente en la determinación de la orientación de cada fotografía con respecto a la precedente. Debe procederse además a un ajuste en la escala del modelo resultante al anterior mediante puntos comunes a ambos modelos. Tanto en el método desarrollado por el NCR como en el BOS la orientación relativa se obtiene por medio de la condición de coplaneidad. El resultado final es una banda continua referida al sistema de coordenadas del primer modelo.

🌐 **Método de modelos independientes:** En este caso el modelo del bloque fotogramétrico se orienta independientemente de forma relativa. El resultado es un conjunto de modelos independientes cada uno con su propio sistema de referencia y su propia escala. El ajuste global del bloque fotogramétrico consiste entonces en una orientación absoluta simultánea utilizando todos los puntos de control disponibles y los puntos de paso y enlace. La principal ventaja del método de modelos independientes es que admite como datos de entrada modelos orientados tanto analítica como analógicamente. La orientación absoluta simultánea de todos los modelos en el bloque fotogramétrico se consigue por medio de transformaciones de semejanza (*tipo Helmert*).

🌐 Un método que se separa radicalmente de estos métodos más tradicionales es el **de ajuste simultáneo** (*Bundle Method*), en donde de forma simultánea y no secuencial se ajusta el bloque fotogramétrico de una forma que podemos denominar (integrada). La principal diferencia con el método secuencial y el de modelos independientes es que la solución (*coordenadas X, Y, Z de los puntos de paso y enlace*) se obtiene directamente y no se efectúan las orientaciones relativas y absolutas de forma separada: en efecto, a partir de las coordenadas imagen (x, y) de las imágenes de los puntos de paso y control, en un ajuste de mínimos cuadrados, se estiman las coordenadas terreno X, Y, Z de los puntos de paso y los elementos de orientación exterior de las fotografías. Los observables y los parámetros están relacionados mediante las ecuaciones de colinealidad en un modelo funcional del tipo $L = F(X)$ de observaciones indirectas. (Tabla 5. 1).

MÉTODO	FASE INSTRUMENTAL			FASE ANALÍTICA	
ANALÓGICA	Formación de los Haces	Formación del Modelo y Medida de Coordenadas	Formación de la Pasada	Compensación de Pasadas (Independientes)	Compensación de un Bloque de Pasadas
				Compensación en bloque de pasadas	
SEMIAUTOMÁTICA	Formación De Los Haces	Formación Del Modelo Y Medida De Coordenadas	Formación de la/s Pasada/s	Compensación de Pasadas (Independientes)	Compensación de un Bloque de Pasadas
				Compensación en Bloque con Pasadas	
			Modelos o Secciones	Compensación en Bloque a partir de Modelos o Secciones	
ANALÍTICA	Medida de Coordenadas Placas	Formación de los haces y del Modelo	Formación de la/s Pasada/s	Compensación de Pasadas (Independientes)	Compensación de un Bloque de Pasadas
				Compensación en Bloque con Pasadas	
			Modelos o Secciones	Compensación en Bloque a partir de Modelos o Secciones	
Compensación en bloque con haces de rayos					

Tabla 5. 1. Esquema de la fase de adquisición y procesamiento de datos según Jordan, Eggert y Kneissal.³⁷

³⁷ Fuente. http://www.leica-geosystems.com/uk/en/reporter40_sp.pdf

5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE TRIANGULACIÓN AÉREA.

Existen varios criterios para establecer la clasificación de los métodos de aerotriangulación, cada uno de ellos tiene sus condicionantes como puede ser el instrumental necesario para su aplicación y cálculo.

🌐 Respecto de la *unidad de trabajo*:

- ⊕ Modelos aislados.
- ⊕ Pasada simple.
- ⊕ Bloque de pasadas.
- ⊕ Bloque de secciones.

🌐 Respecto al *control terrestre*:

- ⊕ Con control geodésico.
- ⊕ Sin control geodésico.

🌐 Respecto al *modo de operar* (es la clasificación más utilizada):

⊕ Planimetría o Radial:

- ❖ Gráfica.
- ❖ Numérica.
- ❖ Mecánica.

⊕ Espacial (X, Y, Z)

- ❖ Analógica: triangulación por pasadas o Aeroplignación.
- ❖ Semianalítica: modelos independientes.
- ❖ Analítica: secuencial o simultánea.

Los métodos espaciales han venido utilizándose desde los años 60 ininterrumpidamente hasta hoy.

Los procedimientos analógicos incluyen la realización manual de la orientación relativa y absoluta de los modelos, utilizando instrumentos de restitución provistos de intercambiadores de bases y caminos ópticos, seguido de la medición de las coordenadas instrumentales (modelo). El ajuste posterior, para obtener las coordenadas bloque, se hace de forma gráfica o de forma analítica. Este procedimiento únicamente solo tiene interés histórico al igual que los métodos radiales.

En la aerotriangulación semianalítica se hace solamente la orientación relativa (formación del modelo estereoscópico se realiza de forma analógica) y la medida de las coordenadas en el restituidor (instrumentos universales).

La orientación absoluta se hace de forma analítica, así como el ajuste y determinación de las coordenadas bloque.

El método analítico consiste en la medición de coordenadas fotográficas seguido de la determinación analíticamente de las orientaciones relativa y absoluta y de las coordenadas bloque ajustadas.

De todos estos procedimientos, existe una gran cantidad de variantes según su adaptabilidad a los siguientes factores:

- 🌐 Instrumentos disponibles.
- 🌐 Aspectos económicos.
- 🌐 Preferencias.
- 🌐 Facilidad de acceso a programas.
- 🌐 Precisión y tipo de aplicación.

En la mayoría de los casos, la formación y el ajuste del bloque se realiza en una sola operación.

Hay que añadir que las coordenadas de los puntos que se lean en el instrumento, han de ser corregidas de errores sistemáticos (esfericidad, refracción, distorsiones, etc.); para ello, es necesario introducir en el cálculo los valores que nos permitan calcular estas correcciones.

Si se dispone de datos auxiliares (observaciones GPS, estatoscopio², barómetros de precisión³⁸, APR³⁹) también han de ser integrados en el cálculo con objeto de reducir al máximo el número de incógnitas y obtener un resultado lo más homogéneo posible.

³⁸ Estatoscopio, instrumento que permite determinar la diferencia entre alturas de vuelo entre las estaciones de la cámara, lo cual equivale a bz (± 1 m).

³⁹ APR (Analytical Profile Reorder), es una combinación de estatoscopio y radar altimétrico que determina alturas absolutas, permitiendo obtener precisiones absolutas de 0.8 m para una altura media

5.4. PRINCIPIO DE LA TRIANGULACIÓN AÉREA ESPACIAL.

Con el objeto de comprender más fácilmente estos procedimientos, se va a considerar un restituidor con varios proyectores tipo "Multiplex" que se compone de una serie de proyectores suspendidos de una barra metálica apoyada en dos soportes que descansan sobre una mesa de gran solidez como puede observarse en la (Figura 5. 12) ⁴⁰.

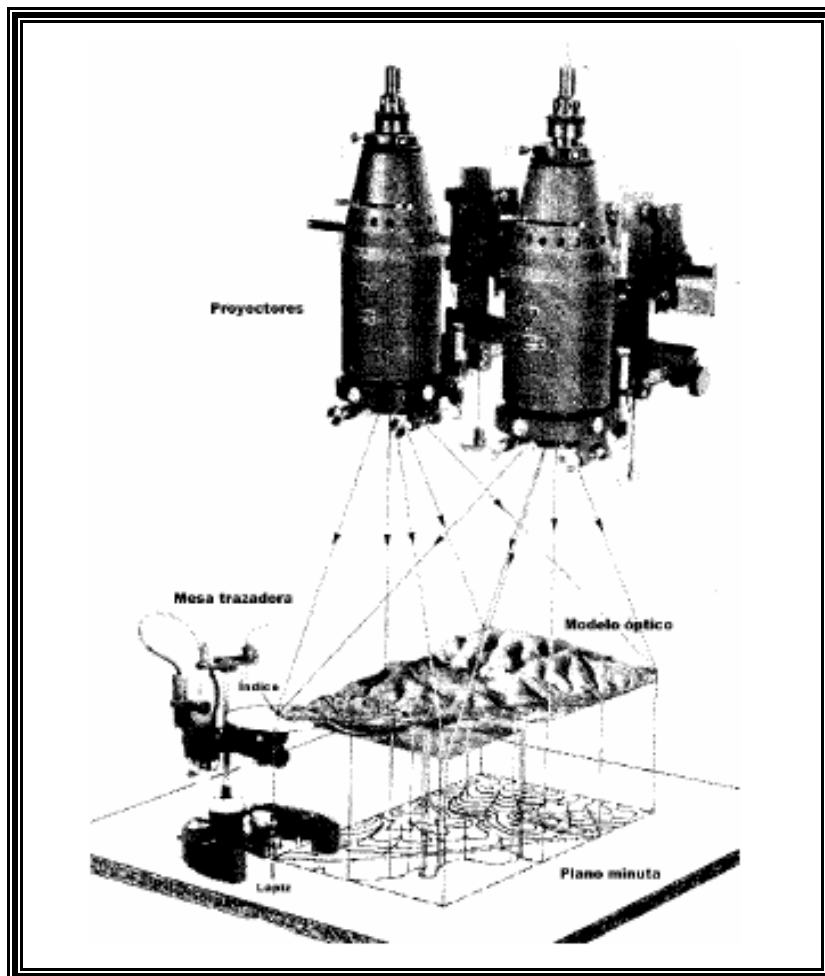


Figura 5. 12. Instrumento de proyección óptica (Multiplex).

Si colocamos las diapositivas 1 y 2 en los dos primeros proyectores, se podría formar el primer modelo haciendo la orientación relativa de ese par (Figura 5. 13). Si disponemos de puntos de apoyo (de campo) suficientes (mínimo tres) en ese modelo, podríamos hacer la orientación absoluta también y por tanto sería factible su restitución.

⁴⁰Fuente- http://www.leica-geosystems.com/uk/en/reporter40_sp.pdf

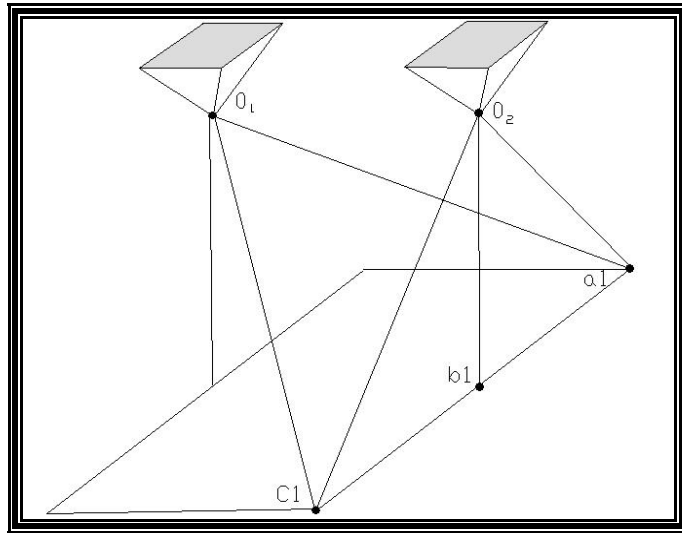


Figura 5. 13. Orientación del primer modelo.

El problema está ahora en la restitución del modelo siguiente, pues no existe apoyo. Sin embargo sabemos que las diapositivas 1 y 2 están orientadas absolutamente. Si ahora colocamos la diapositiva 3 en el tercer proyector y la orientamos con respecto ("relativamente") al proyector que contiene la diapositivas 2, utilizando en la orientación relativa los elementos del nuevo proyector, la diapositivas 3 quedará absolutamente nivelada con respecto al plano de referencia o datum empleado.

El nuevo modelo estará orientado en relativa y estará hecha parcialmente la orientación absoluta (nivelación del modelo) pero tendrá una escala arbitrada pues no hemos determinado aún la componente b_x de la base (Figura 5. 14).

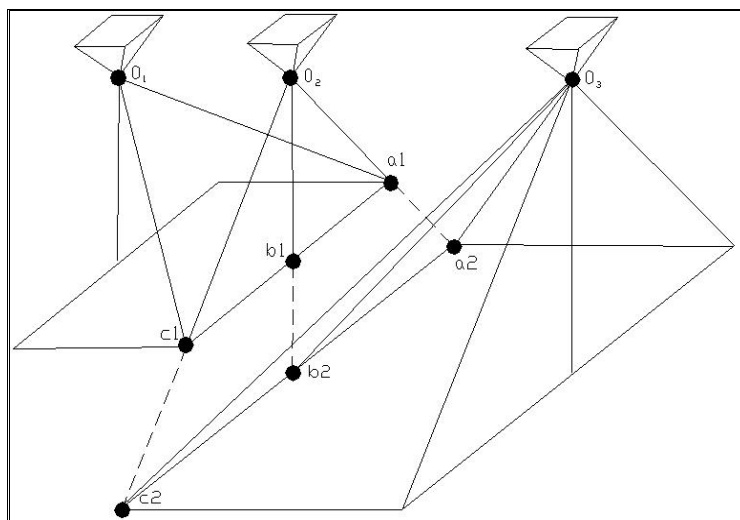


Figura 5. 14. Orientación del segundo modelo.

Para ello, debemos poner el modelo segundo a la misma escala que tenía el modelo primero. Lo podemos hacer comparando una distancia común (\overline{ac}) a ambos modelos situada en la zona de recubrimiento que existe entre ellos y variando la distancia entre los proyectores con el movimiento b_x del que contiene la diapositiva 3 igualaremos las distancias. Una vez que las distancias son iguales ($d_{a1}^{c1} = d_{a2}^{c2}$) los dos modelos estarán a la misma escala (Figura 5. 15).

El modelo segundo tendrá ahora la orientación correcta y podría ser restituído, pero solo vamos a medir coordenadas instrumentales de los puntos seleccionados (marcados en las diapositivas) en la fase de preparación (que van a ser puntos de apoyo complementarios).

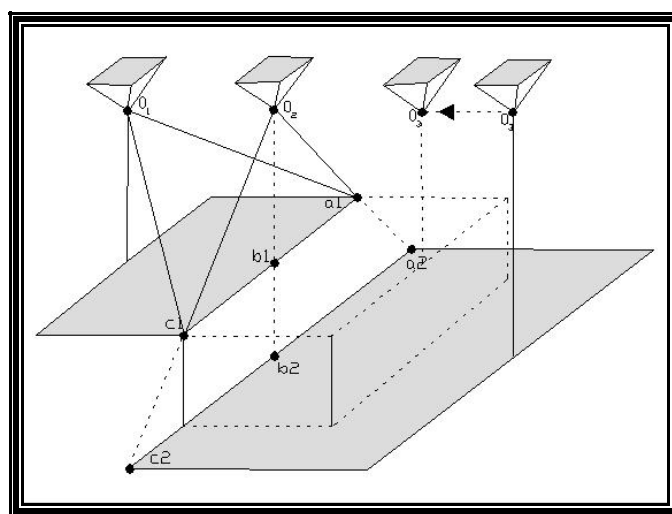


Figura 5. 15. Modelos a idéntica escala

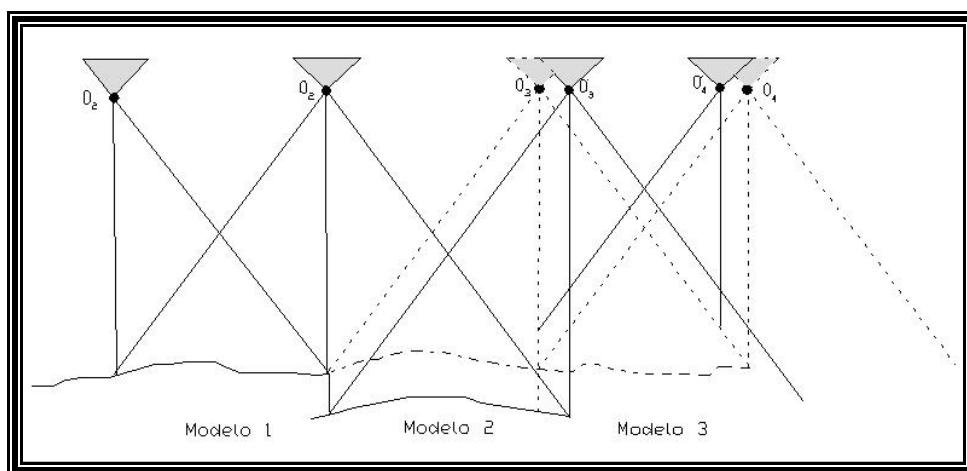


Figura 5. 16. Formación de la pasada.

Podemos colocar la diapositiva 4 en el cuarto proyector y repetir las mismas operaciones de orientación y medir las coordenadas de los puntos seleccionados en este modelo y así sucesivamente hasta llegar al último modelo de la pasada (Figura 5. 16). Tendremos reconstruida toda la pasada en el instrumento de restitución.

En realidad no serían necesarios los puntos de apoyo (de campo) del primer modelo, pues podemos orientar toda la pasada (conocidas las coordenadas terreno de al menos tres puntos de apoyo adecuadamente distribuidos), como si fuese un solo modelo, por cálculos una vez que la fase instrumental haya concluido. Debe quedar bien claro, que es necesario que exista un recubrimiento longitudinal entre fotogramas mayor del 50 %, con objeto de que exista una zona de solape común (del 20 % aproximadamente) entre modelos consecutivos dónde situar los puntos de apoyo complementarios cuyas coordenadas terreno vamos a determinar por métodos fotogramétricos.

El fundamento esencial del método de Triangulación Aérea por Pasadas es la transferencia de los elementos de la orientación absoluta de un modelo a otro a lo largo de la pasada. En la práctica el método no es tan sencillo como el descrito, pero los principios básicos son los mismos.

5.5. FUENTES DE ERROR EN LA TRIANGULACIÓN AÉREA.

Las fuentes de error más importantes a considerar en la aerotriangulación son:

- ④ El fotograma.
- ④ El instrumento de restitución.
- ④ La propia observación.

El fotograma está afectado por los siguientes errores:

- ④ Distorsión dimensional (sistemática o uniforme, diferencial sistemática e irregular).
- ④ Falta de planeidad (durante la toma en el instrumento).
- ④ Falta de nitidez.
- ④ Distorsión del objetivo y defectos de orientación interna de la cámara).
- ④ Curvatura terrestre y refracción atmosférica.

El operador genera errores de:

- ④ Precisión en el posado del índice.
- ④ Precisión en la eliminación de paralajes.
- ④ Errores groseros (pe. equivocaciones en la identificación de puntos).

5.6. APLICACIONES DE LA TRIANGULACIÓN AÉREA.

El desarrollo de la triangulación aérea fue debido a la necesidad de disminuir la dependencia de la fotogrametría de la topografía, con el fin de agilizar las ejecuciones cartográficas reduciendo las necesidades de control terrestre, siendo esta su principal aplicación. A continuación se exponen las aplicaciones cartográficas y otras que son muy interesantes.

Cartografía.

- ④ La fase de orientación absoluta precisa de la determinación de cuatro puntos de apoyo por par de fotografías que situándolo en las zonas comunes entre fotografías consecutivas a lo largo de las pasadas y entre pasadas adyacentes este número se reduce a 1.5 puntos por par, cuando el bloque es grande.
- ④ Mediante la aplicación de los métodos de triangulación aérea se reduce el número de puntos de control necesarios y también la dependencia de la distribución del mismo con la consiguiente agilización de los mismos.
- ④ Al realizar la orientación absoluta el operador necesita identificar los puntos de apoyo mediante el croquis realizado en el campo.
- ④ Mediante la triangulación aérea estos puntos están materializados en las diapositivas mediante una marca o son puntos pre-señalizados.
- ④ Los parámetros de orientación absoluta determinados durante la ejecución de la triangulación aérea pueden ser introducidos en los micrómetros de los analógicos, minimizando el tiempo de ejecución de esta fase.
- ④ En instrumentos analíticos estos parámetros son almacenados, de forma que para orientar un modelo posteriormente solamente sería necesario realizar la orientación interna y recuperar del fichero los valores correspondientes.
- ④ Como se ha visto la aplicación de la triangulación aérea en las ejecuciones cartográficas no solo se reduce a la reducción del número de puntos de control necesarios, que justificaría su empleo, sino que también facilita una serie de tareas durante la orientación absoluta.

Modelos digitales del terreno (MDT).

- ④ La adquisición de datos para mapas digitales puede hacerse durante la triangulación aérea especialmente para modelos digitales altimétricos.
- ④ Estos son un producto independiente por “sí” mismo para aplicaciones posteriores en proyectos de ingeniería. Son básicos para un plan nacional de ortofotografía y rectificación de imágenes escáner desde el espacio.
- ④ A partir de ellos se puede realizar el curvado automático sustituyéndolo por el convencional.

Densificación de redes.

- ④ La determinación fotogramétrica de las coordenadas de un punto ha alcanzado un nivel de precisión que hace posible su aplicación a problemas geodésicos, en particular a la determinación de redes de orden inferior (4º orden) a partir de las de orden superior.
- ④ Con puntos pre señalizados en bloques de moderado tamaño bien controlados la precisión esta establecida en 10 micras en placa y es casi independiente del tamaño del bloque. Así la precisión de los puntos en el terreno depende fundamentalmente de la escala de la foto y la señalización de los puntos.
- ④ Esta densificación de redes puede ser aplicada a la determinación de bases de replanteo con fines catastrales o de ingeniería civil.
- ④ Cualquier otro tipo de trabajo que precise la obtención de una serie de puntos con gran precisión como obtención de perfiles longitudinales o transversales de elementos lineales (ríos, carreteras, ferrocarriles, etc.), enlace altimétrico de embalses y zonas de regadío dentro de una misma cuenca, control de movimiento de taludes, etc., puede ser realizado mediante ejecución de métodos de triangulación aérea analítica.

CAPÍTULO 6.

Restitución Fotogramétrica.

6.1 INTRODUCCIÓN.

Una vez hechas todas las consideraciones del Proyecto fotogramétrico donde se determine que se debe hacer la restitución fotogramétrica se inicia el proceso de restitución cuyos pasos se explicarán en forma y fondo detalladamente a continuación.

Para realizar una restitución fotogramétrica se debe contar con el Siguiete material e información:

- 🌐 Fotogramas.
- 🌐 Fotogramas digitales (solo para sistemas de restitución Digital).
- 🌐 Puntos de apoyo o de control.

Si A y B son dos posiciones sucesivas del avión desde los que se han tomado fotografías. Los rayos de luz han impresionado las placas, mediante dos haces perspectivas (Figura 6. 1)⁴¹.

Al colocar las fotografías en la misma posición relativa respecto a la que tenían cuando fueron impresionadas y si las iluminamos con proyectores, se volverían a formar los mismos haces iniciales.

Los rayos homólogos se cortarían, dándonos sus intersecciones una reproducción exacta del terreno. Ocurrirá que como esta operación se hace en gabinete, la distancia A-B será más pequeña y el estéreo modelo estará a una cierta escala.

El problema a resolver consistirá en conseguir en gabinete la reproducción de la posición exacta de los dos haces de rayos y que su situación respecto al terreno, sea análoga a la que tuvieron al ser impresionadas ambas fotografía durante el vuelo.

La operación a través de la cual se consigue todo esto es la **ORIENTACIÓN INSTRUMENTAL**, la que esta compuesta por dos etapas:

- A. Orientación Interna
- B. Orientación Externa.

⁴¹ Fuente. <http://es.cartodata.com>

Los parámetros de control de cada proyector que simulan a la cámara en el instante de toma se muestran en la (Figura 6. 2)⁴² que consta de tres movimientos lineales y tres angulares.

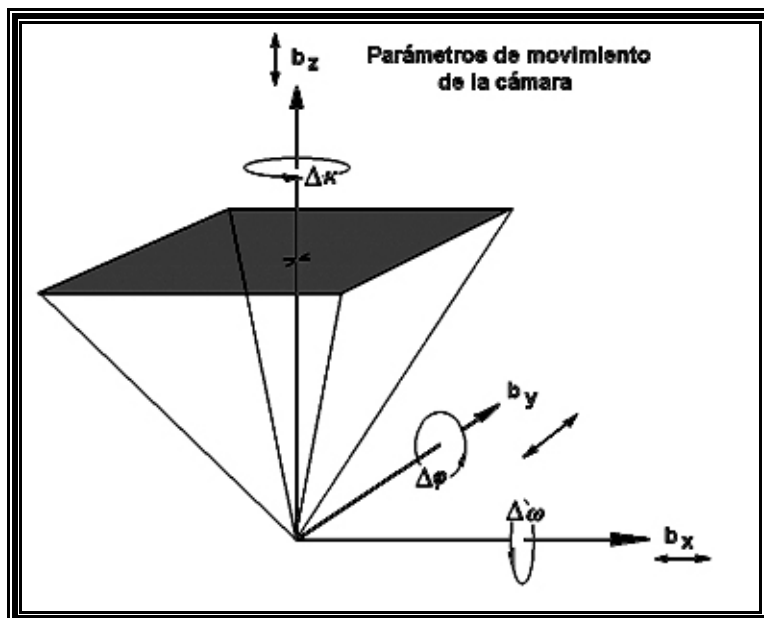


Figura 6. 1. Posiciones sucesivas del avión.

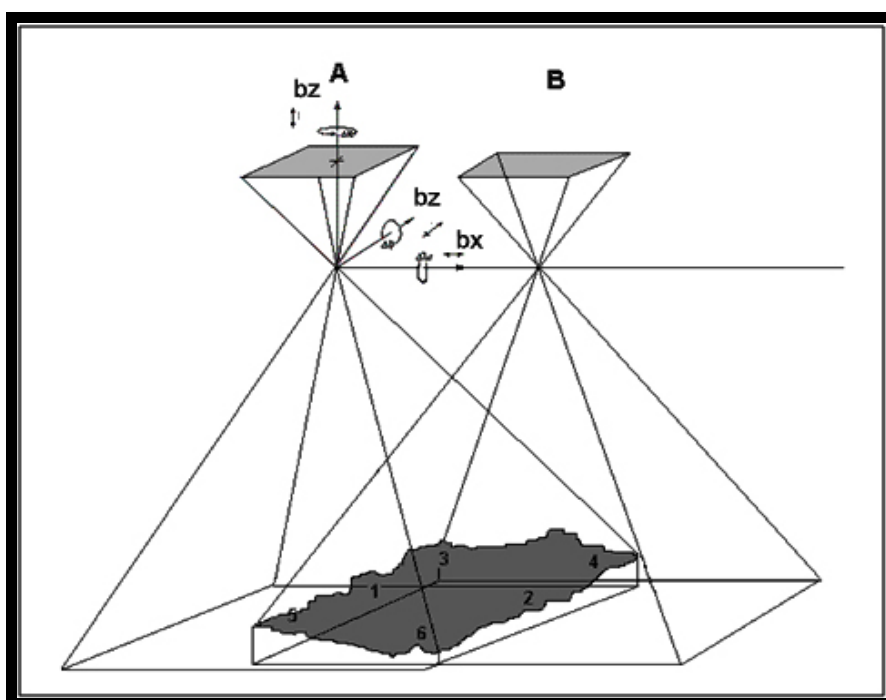


Figura 6. 2. Parámetros de control de cada proyector.

⁴² Fuente. www.es.cartodata.com

6.1.1 ORIENTACIÓN INTERNA.

La orientación interior o interna, se define la geometría de una cámara o sensor tal como existía en el momento de la captura de los datos. Las variables asociadas con el espacio de la imagen son definidas durante el proceso de orientación interna. La orientación interna se usa principalmente para transformar el sistema de coordenadas de la imagen en el sistema de coordenadas espaciales de la imagen.

La geometría interna de una cámara está definida especificando las Siguietes variables:

- ④ Punto principal.
- ④ Distancia focal.
- ④ Marcas fiduciales.
- ④ Distorsión del lente.

Para realizar este proceso se debe contar con la Siguiete información:

- ④ **Certificado de Calibración del Instrumento restituidor a ocupar:** Este certificado indica si el instrumento está en condiciones geométricas para trabajar, o sea la perpendicularidad generada por los planos xy ; xz y $z y$, además de el ajuste inicial en 0° de los movimientos angulares de κ , Φ , ω que representan los movimientos del avión en el instrumento.
- ④ **Certificado de Calibración de la Cámara Métrica:** Contiene los parámetros básicos de la geometría de la cámara que son: Identificación de la cámara, fecha de calibración, focal de toma, Punto principal de auto colimación (PPA), Punto principal de Simetría (PPS), Distancia entre marcas fiduciales (En foto coordenadas con origen en el Foto centro) y Distorsión radial de la lente. La orientación interna es la reconstitución de los haces perspectivos que originaron cada imagen, en forma independiente, otra interpretación de la definición es el recuperar la geometría del instante de toma del fotograma, ya que la fotografía extraída físicamente genera dilataciones que deforman la geometría del instante de toma, para tal efecto, debemos realizar dos pasos:
 - ⊕ **Centrado de Placa o Fotograma:** Consiste en hacer coincidir las marcas fiduciales como referencia de los fotogramas, con las marcas fiduciales del portaplacas del instrumento (que definen un sistema de foto coordenadas mediante las coordenadas de máquina o instrumentales). Este procedimiento operativamente se hace con un sistema centrador de placas, que aseguran un ajuste análogo de alta precisión.

- ✦ **Ajuste de Focal:** Es el procedimiento matemático por el cual se determina e impone el valor de la nueva focal que adquiere el fotograma al ser incorporado al sistema de restitución. Esto sucede por que el formato de cada fotograma sufre una dilatación (Linealmente denominada ΔD que lo altera y por lo tanto cambia la escala, al cambiar la escala forzosamente debemos cambiar la focal de toma a una focal corregida **fc**.

6.1.2 ORIENTACIÓN EXTERNA O EXTERIOR.

Para lograr una buena reconstrucción tridimensional de un objeto en el espacio es mediante el empleo de dos fotografías del objeto tomadas desde puntos de vista diferente (estéreo-fotogrametría). Se trata entonces de un problema de intersección en el espacio donde cada punto del objeto esta determinado por un par de rayos que salen desde los centros de proyección y se cortan en dicho punto. (Figura 6.3)⁴³

Con la orientación interior de un fotograma conseguimos conocer perfectamente la posición del centro de proyección con respecto a un sistema de coordenadas situado en la misma placa:

En este caso estamos hablando de tres grados de libertad. Pero para poder reconstruir un objeto situado en el espacio a partir de su perspectiva fotográfica también se necesita conocer la posición de ese fotograma en el espacio esto es la Orientación Exterior.

La orientación exterior define la posición y la orientación angular asociada con una imagen. Las variables que definen la posición y orientación de una imagen son referidas como elementos de la orientación exterior.

Los elementos de la orientación exterior definen las características asociadas con una imagen en el momento de la exposición o captura. Los elementos posicionales de la orientación exterior incluyen X_o , Y_o , Z_o .

Ellos definen el centro de perspectiva (O) con respecto al sistema de coordenadas espaciales del terreno (X, Y, Z). Z_o es usualmente referido como altura de la cámara sobre el nivel medio del mar (N.M.M.), la cual está definida usualmente con respecto a un Datum.

⁴³ <http://www.comie.org.mx>

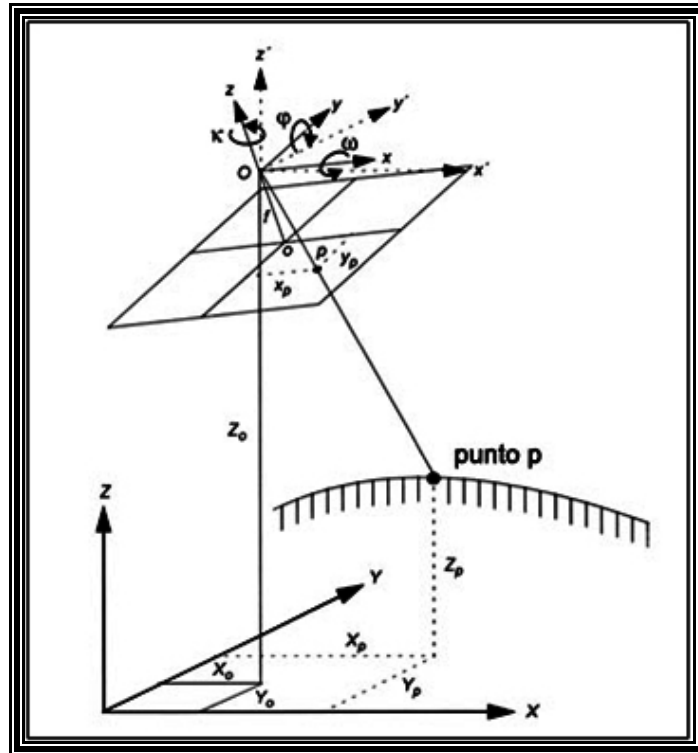


Figura 6. 3. Elementos de la orientación exterior

6.2 ORIENTACIÓN RELATIVA.

Al introducirse en las imágenes en los porta-fotogramas del instrumento y hacerse la proyección por medio de dos fuentes de luz, su orientación relativa corresponderá, aproximadamente a la exacta, pero las proyecciones de un mismo punto de ambos fotogramas (homólogos) no coincidirán, si no que presenta una cierta diferencia en la ordenada de dichos puntos, es decir, una paralaje vertical P_y .

La paralaje P_x siempre se puede hacer cero, puesto que es función únicamente de un desplazamiento vertical de la mesa de proyección (con el tambor de cota).

La eliminación de estos paralajes verticales en la proyección estereoscópica que se denomina modelo, se consigue haciéndolos cero en cinco puntos distribuidos en éste, además de un sexto punto, que sirve para controlar la correcta ejecución de la orientación relativa.

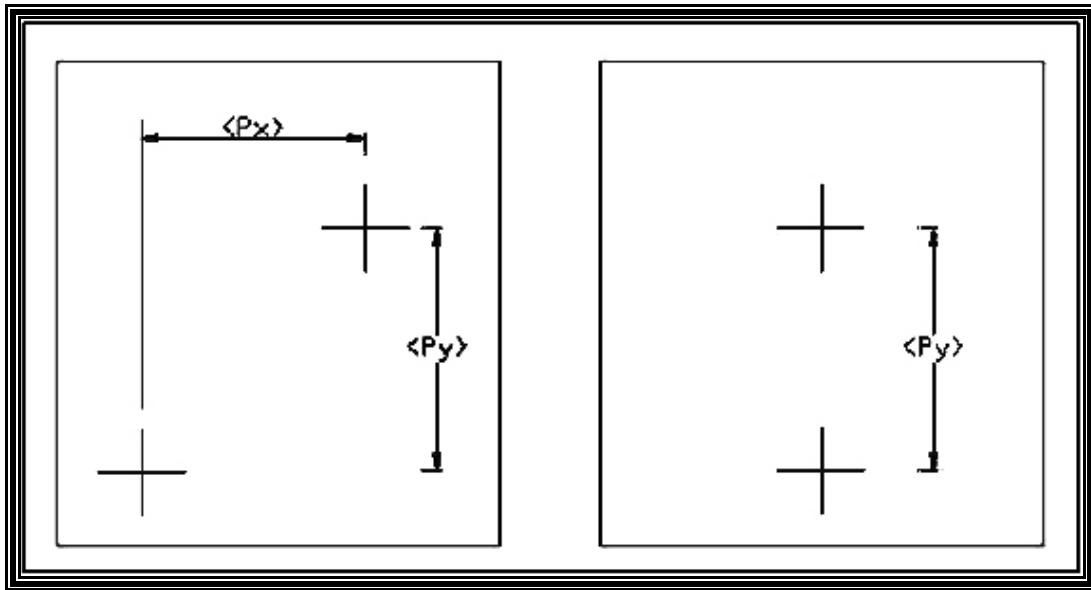


Figura 6. 4.Desplazamientos en el modelo, entre dos puntos homólogos.

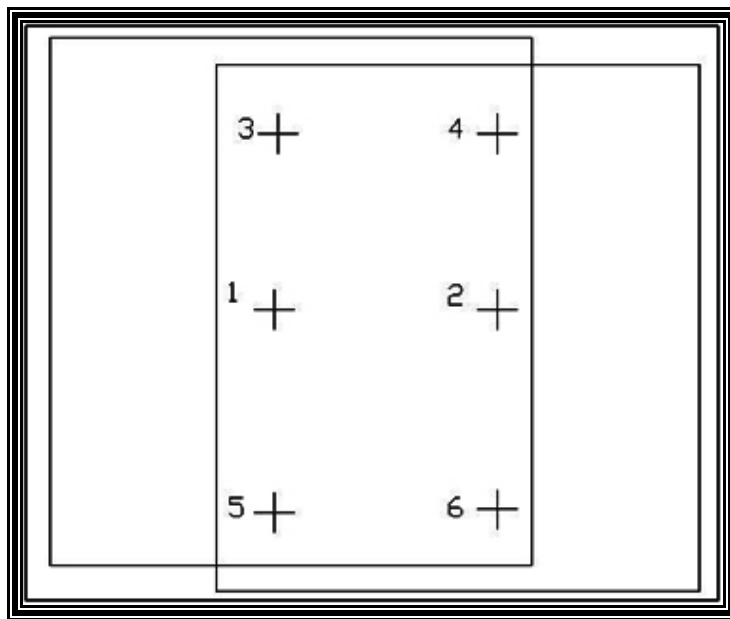


Figura 6. 5. Distribución de los puntos en el modelo, para la eliminación de las paralajes verticales.

Las cámaras de los instrumentos fotogramétricos presentan los suficientes grados de libertad, como para poder efectuar esta operación.

Estos grados de libertad o elementos de orientación relativa se clasifican en:

- 🌐 Elementos angulares ($X', X'', \theta', \theta'', \omega'$ y ω'')
- 🌐 Elementos de traslación o lineales ($b'x, b'y, b'z, b''x, b''y, b''z$).

En la Figura 6. 6 se representa las distintas influencias de los movimientos angulares. Según ellos, vemos que en los seis puntos del modelo se pueden eliminar las paralajes con estos movimientos.

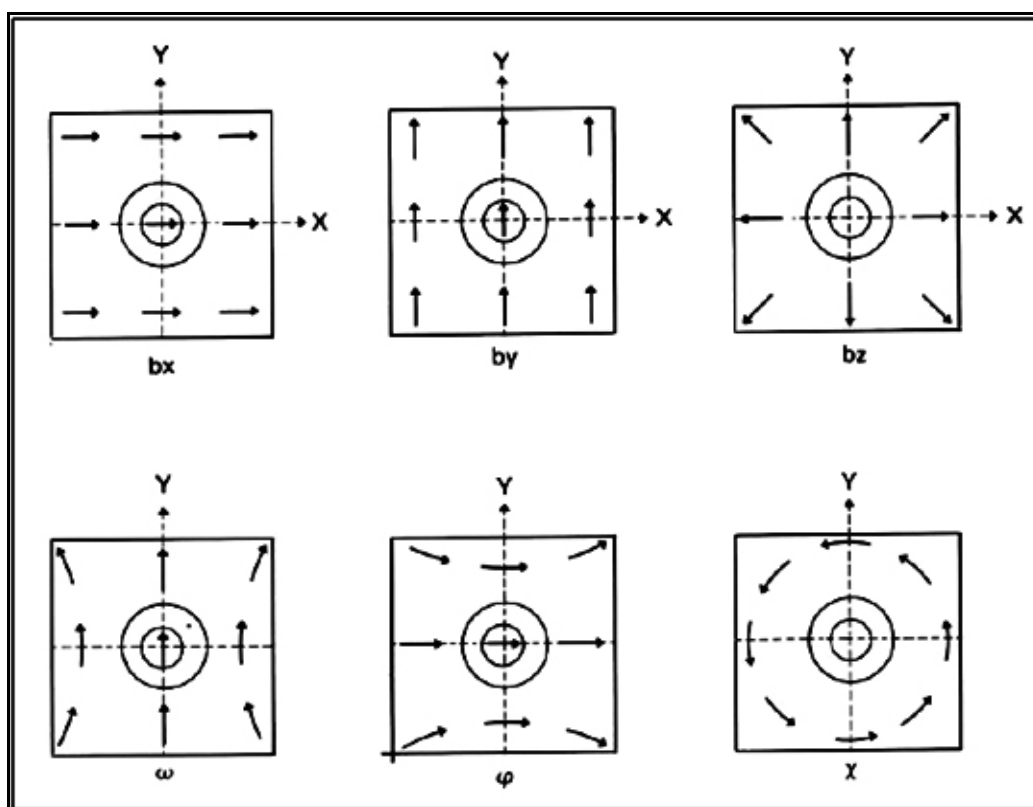


Figura 6. 6. Influencia de los distintos elementos de orientación, en la formación de paralajes en el plano

El proceso a seguir implica que al hacer las modificaciones de posición en los proyectores, que darán lugar a las correcciones de orientación, habrá que operar de forma que se produzcan las máximas variaciones en los puntos que precisan corrección, y la mínima, en aquellos ya corregidos.

6.2.1 MÉTODOS GRÁFICOS O EMPÍRICOS DE ORIENTACIÓN RELATIVA.

Estos métodos se conocen también como métodos de orientación de Von Gruber, O métodos óptico-mecánicos, dado que es la solución más general de ese tipo de instrumentos.

Al formarse el modelo, los desplazamientos contenidos en el eje Y siempre estarán presentes, y los paralelos a la recta Y hacia la derecha, corresponderán al proyector de la derecha y los de la izquierda, al de la izquierda.

Según esto, deducimos lo Siguiente:

La paralaje debido al elemento X, estando la vertical del modelo en , es nula en el centro de rotación, punto 2; prácticamente despreciable en los puntos 4 y 6, e iguales y del mismo sentido en los puntos 3, 1 y 5. En el caso de estar la vertical del modelo en 2, la situación sería simétrica, respecto a la izquierda (Figura 6. 7).

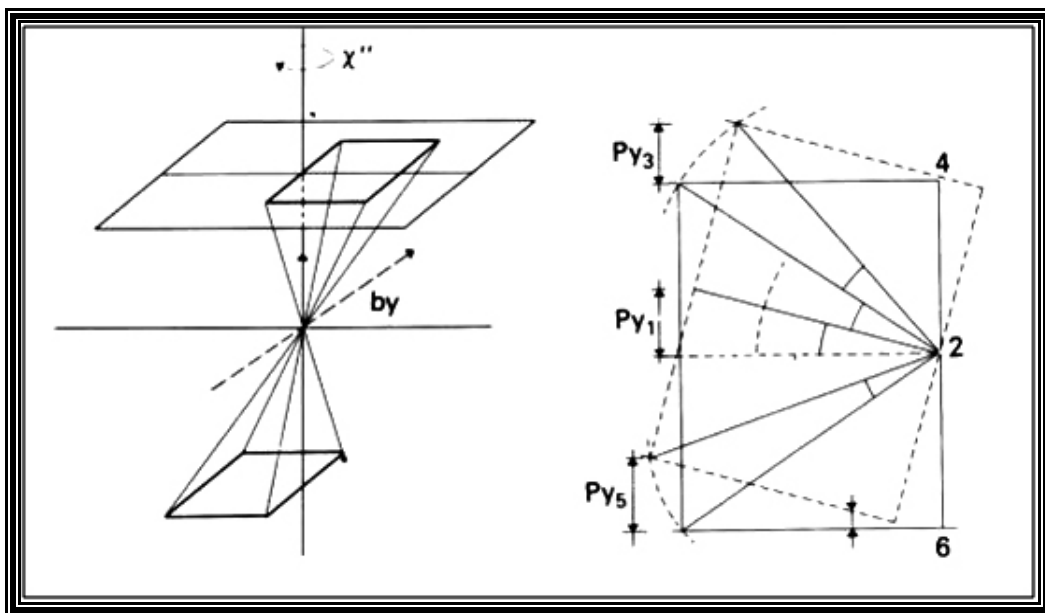


Figura 6. 7. Paralaje debido al elemento X

La paralaje debido a la inclinación φ representa cómo ésta es nula en los puntos 1 y 2, despreciable en 4 y 6, e iguales y de sentido contrario en 3 y 5, caso de que la vertical pase a través del punto 2. (Figura 6. 8).

Con respecto a la causa de error, debido a la inclinación transversal, se ve en la Figura 6. 9, como son del mismo sentido en 3, 4, 5, y 6, y más pequeños, y de igual sentido en 1 y 2.

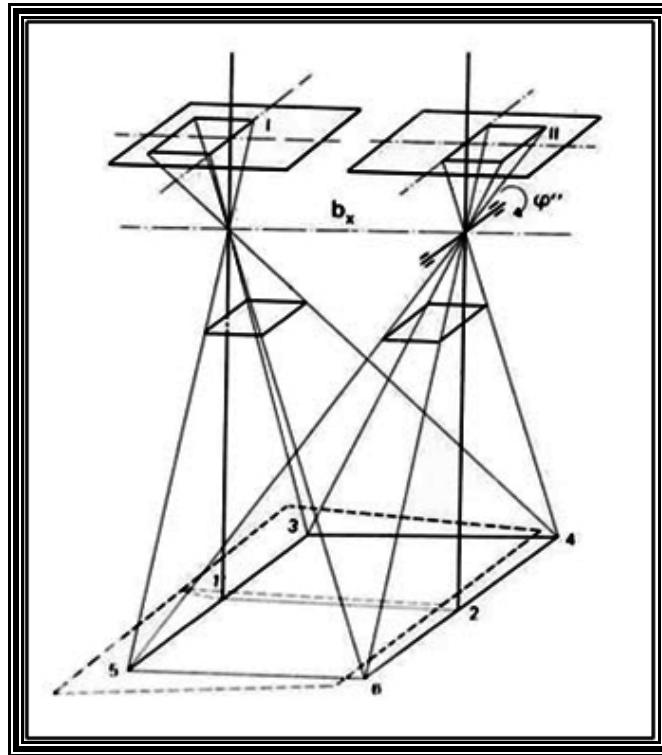


Figura 6. 8. Paralaje debido al elemento Φ

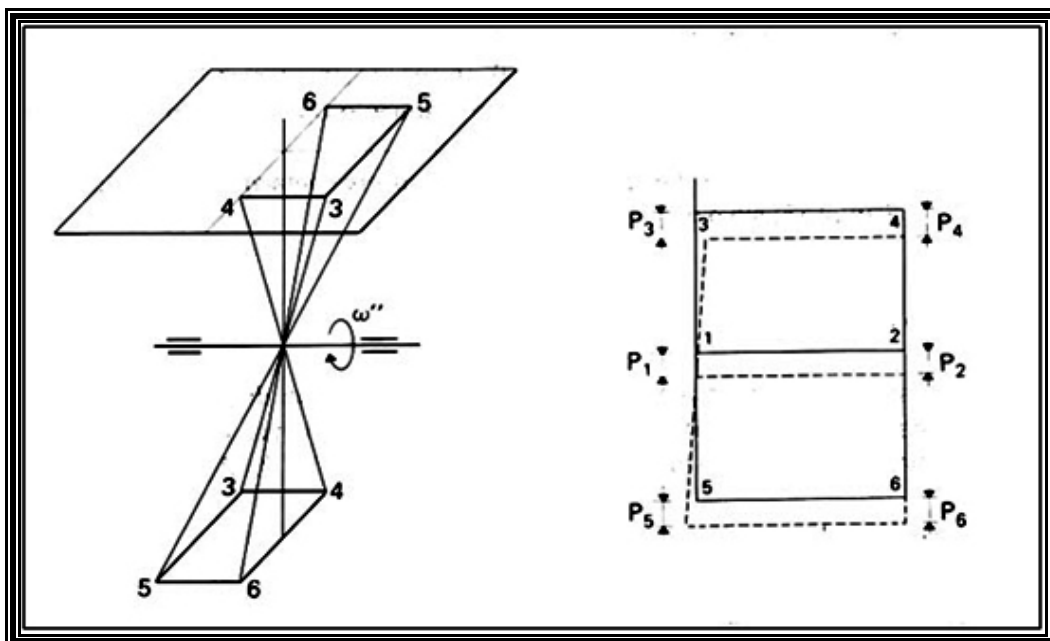


Figura 6. 9. Paralaje debido al elemento ω

El método de ambas cámaras o de rotaciones, realiza el proceso de la siguiente forma:

- 1.- Se anula la paralaje en el punto 1 con X'' .
- 2.- Se anula la paralaje en el punto 2 con X' .
- 3.- Se anula la paralaje en el punto 3 con Φ_3'' .
- 4.- Se anula la paralaje en el punto 4 con Φ_4' .
- 5.- La paralaje existente en el punto 5 se corrige introduciendo otra en el sentido contrario, igual a la mitad del desplazamiento observado en dicho punto, con cualquiera de los elementos ω .
- 6.- Se repiten los pasos 1 al 5 hasta que no tengamos paralajes verticales en el punto 5.
- 7.- El punto 6, sirve para controlar el proceso.

6.3 ORIENTACIÓN ABSOLUTA.

Los siete parámetros precisos para realizar la orientación absoluta, tiene por finalidad resolver los siguientes problemas:

- a.- Dar escala al modelo.
- b.- Efectuar tres desplazamientos del modelo con respecto al plano.
- c.- Realizar tres giros del modelo, con relación al plano.

La escala de este modelo es desconocida o solo se conoce aproximadamente, así como la posición del modelo respecto a la vertical. Esto se debe, desde luego, al hecho de que con el material actual de realizar una fotografía, es imposible ya sea determinar la altura de vuelo de manera exacta, o tener la cámara fotográfica rigurosamente en la vertical.

Esta situación demuestra la necesidad de una orientación absoluta del par.

El método de orientación absoluta consiste pues en una puesta en escala y en una orientación de verticales del modelo, siendo llamada la segunda operación también "orientación de verticales" o basculamiento, de manera que todas las distancias y alturas correspondan a la realidad.

Es necesario de disponer de una red de puntos de partida que no es determinada obligatoriamente sobre el terreno, sino también por triangulación aérea u otro método, para poder comparar las mediciones "modelo" con los de la "realidad".

En vista de que el problema consiste, en primer lugar, en una puesta en escala, hay que disponer, por lo menos, de dos puntos conocidos en posición en (x, y) en el par.

El basculamiento debe basarse desde luego, en tres puntos conocidos en alturas (como para la nivelación de un plano) y repartidos convenientemente en el recubrimiento de dos clisés (en el modelo estereoscópico).

Junto con la construcción diferente de los aparatos de restitución, los métodos de orientación también cambian sensiblemente. El principio consiste en medir, primero, la distancia modelo entre dos puntos que se encuentran sobre la red de puntos de control y, luego, cambiar la distancia entre los dos aparatos de proyección, por tanteo o por una cantidad calculada hasta que la distancia modelo tenga la misma longitud que la distancia real (dividida por la escala elegida del modelo). Ahora, el modelo se pone a la escala, pero, ya que todavía no está inclinado, dicha escala no es definitiva.

Después de ello, se hacen girar todos los aparatos de proyección alrededor del eje de las x y del eje de las y en los valores necesarios para la eliminación de la diferencia de altura sobre los puntos de control.

Estando ahora el modelo en posición horizontal, no queda más que verificar si la escala no ha cambiado; eventualmente, hay que efectuar una pequeña corrección para poder terminar así la orientación absoluta.

6.3.1. ESCALA DEL MODELO.

Implica el determinar la relación de ampliación o reducción entre la escala de la fotografía y la de su proyección. Para ello hay que tener en cuenta las características del instrumento a utilizar.

De la Figura 6. 10 se expresa la escala del modelo como:

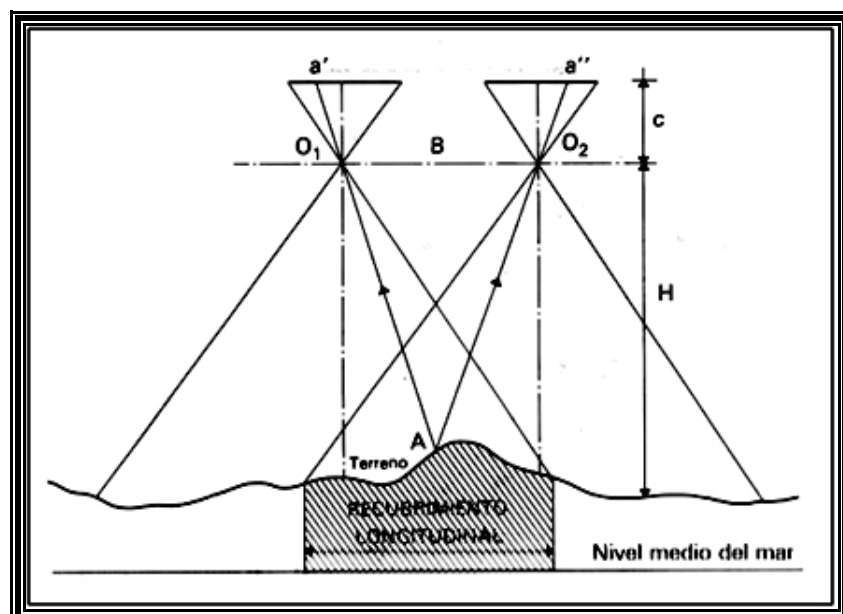


Figura 6. 10. Relaciones métricas entre par fotográfico y el modelo

$$Em = \frac{b}{B} = \frac{h}{H}$$

Em = escala del modelo

b = base del modelo

B = base aérea.

h = distancia de proyección del instrumento.

H = altura de vuelo sobre el terreno.

La escala de la fotografía $Ef = \frac{c}{H}$; $Em = \frac{h}{c} * Ef$

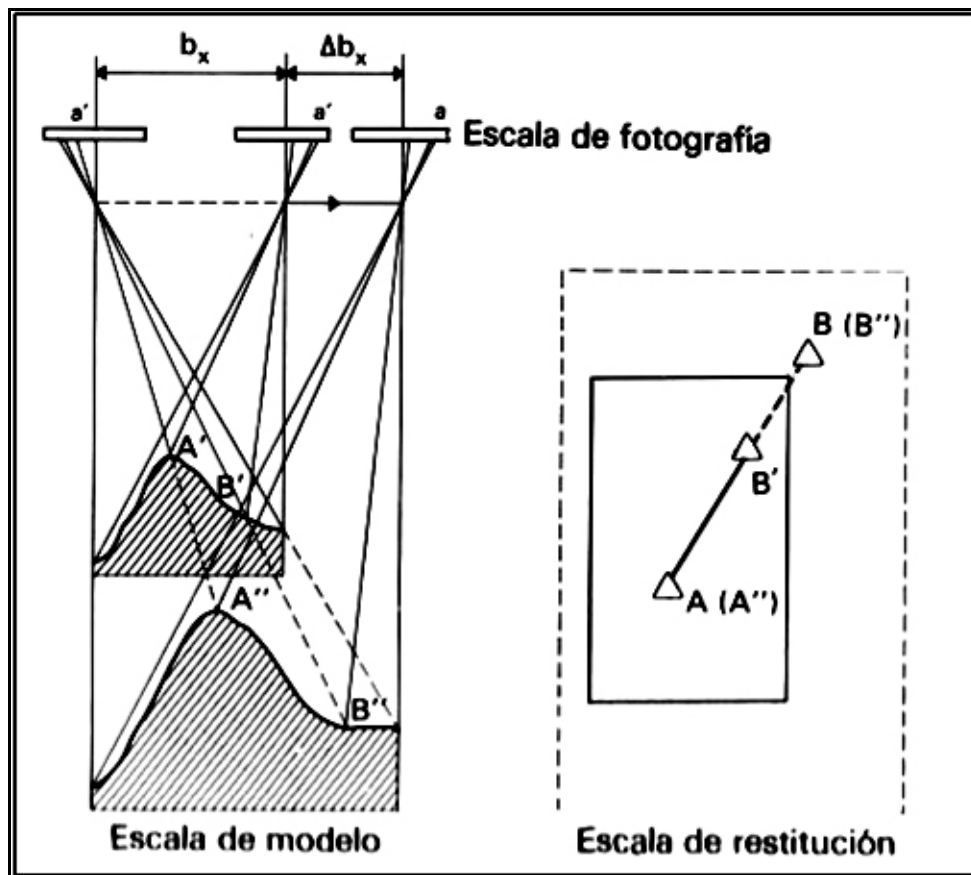


Figura 6. 11. Efecto de la variación de la base en la formación de la escala del modelo, y su puesta en escala.

6.4. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL. LA IMAGEN DIGITAL.

Una imagen digital es una función $F(x,y)$ donde x e y representan unas coordenadas y el valor $F(x,y)$ es proporcional a la transmitancia o reflectividad de la luz, que se reconoce usualmente por el nivel de color o gris de la misma en el punto considerado (Figura 6. 12)⁴⁴. Al proceso de obtención de imágenes digitales se le denomina digitalización y consiste en la descomposición de la imagen real en una matriz discreta de puntos de un determinado tamaño, donde cada elemento recibe un valor proporcional a su nivel de color.

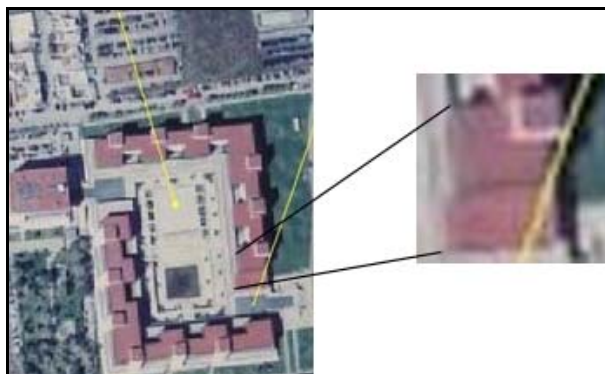


Figura 6. 12. La imagen digital. Izq.: Fragmento de una fotografía aérea en formato digital. Der: Ampliación de un elemento de la imagen -casa-.

6.4.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA UTILIZACIÓN DE IMÁGENES EN FORMATO DIGITAL EN FOTOGRAMETRÍA.

Las ventajas e inconvenientes de la Fotogrametría Digital frente a otras metodologías fotogramétricas tales como la Fotogrametría Analógica y la Fotogrametría Analítica, son función de las características propias del tipo de imágenes que se emplean, por tanto, las ventajas e inconvenientes están directamente ligados con los correspondientes a la utilización de imágenes digitales.

Ventajas:

1. Las imágenes digitales, por su soporte de almacenamiento carecen de los problemas derivados de la estabilidad dimensional que afecta a las imágenes analógicas cuando se modifican las condiciones medioambientales de su almacenamiento. Por otro lado, al no requerir la

⁴⁴ Fuente. <http://www.inegi.gob.mx/inegi/contenidos/espanol/evento>

manipulación directa a la hora de ser utilizadas se elimina el deterioro producido por esta causa.

2. Las imágenes digitales permiten una fácil duplicación y transmisión siendo únicamente necesario disponer de los medios informáticos apropiados.
3. Las características de la imagen tales como brillo y contraste pueden ser modificadas mediante el empleo de técnicas de análisis de imágenes, con el objetivo de mejorar la calidad visual de la misma y así favorece la interpretación o bien para poner de manifiesto algún tipo de característica de la imagen.
4. Los productos derivados de la Fotogrametría Digital son obtenidos en formato digital por lo que son fácilmente integrables en entornos tipo CAD o S.I.G.
5. Debido a las características de las imágenes empleadas se eliminan gran parte de los elementos de mayor coste de los sistemas analógicos (ópticas y sistemas mecánicos de precisión), disminuyendo de una forma considerable los gastos de mantenimiento. Además, la precisión no está ligada al diseño constructivo del equipo sino a los programas empleados.
6. La utilización de imágenes digitales permite la automatización parcial del proceso con lo que conlleva de aumento del rendimiento, así mismo permite el trabajo en tiempo real o casi real.

Inconvenientes:

1. Se trata de una técnica de muy reciente aparición, por lo que en muchos aspectos aún puede estar inmadura.
2. Los procesos derivados de la necesidad de un proceso de digitalización. Los sistemas de digitalización aún son muy caros.
3. La necesidad de almacenamiento que es muy elevada para los niveles de precisión equivalente a los procesos fotogramétricos analíticos, así una imagen en blanco y negro de 23x23cm digitalizada a una resolución, expresada como tamaño de píxel de 15 μ m ocupa un espacio en disco superior a los 200 Mb (256 tonos de gris), esta cifra se multiplicará por 3 si el almacenamiento se realiza en color real (16.7 millones de colores). Es importante tener en cuenta que en un proyecto se manejan un número considerable de imágenes por lo que los volúmenes de almacenamiento requeridos son importantes.

6.5 EL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL.

El objetivo fundamental de un sistema fotogramétrico, cualquiera que sea la metodología empleada para su construcción es la obtención de información espacial de objetos a partir de imágenes de los mismos, en el caso concreto de los Sistemas Fotogramétricos Digitales, a partir de imágenes en formato digital.

En la Figura 6. 13⁴⁵ se presenta de una forma esquemática el proceso fotogramétrico

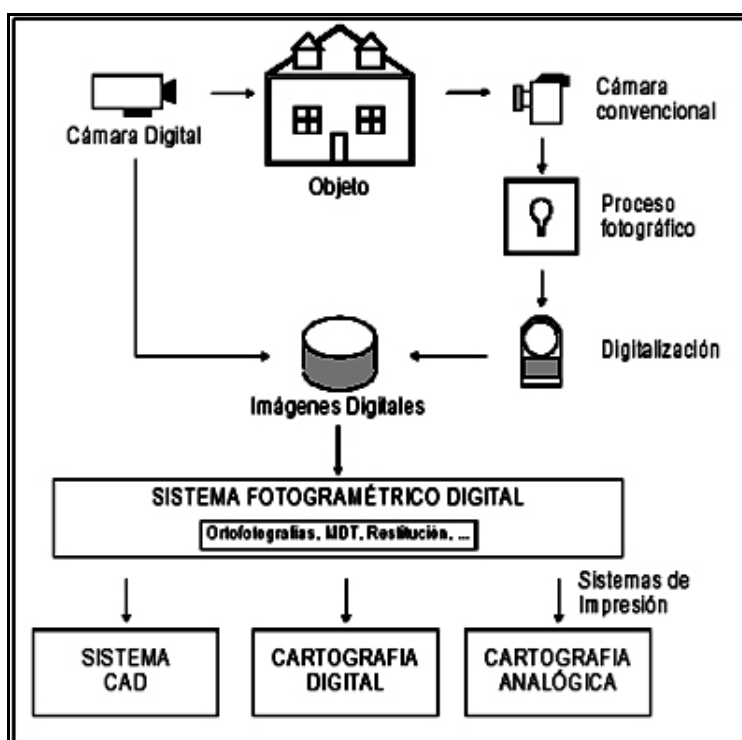


Figura 6. 13. Proceso fotogramétrico.

Un sistema fotogramétrico digital debe cumplir los Sigüientes requerimientos en cuanto a hardware:

- 🌐 un sistema de digitalización de imágenes analógicas.
- 🌐 posibilidad de entrada directa de datos en formato digital (p.ej., cámara digital) para la realización de aplicaciones fotogramétricas en tiempo real.
- 🌐 sistema de medida 3D de imágenes digitales de diferentes fuentes y geometrías.

⁴⁵ Fuente. <http://www.bikemontt.cl//index.php>

- ④ manipulación y procesamiento de imágenes de gran tamaño en un tiempo razonable.
- ④ generación automática de modelos digitales de elevaciones con precisión a nivel de subpixel.
- ④ obtención de ortofotografías digitales en un tiempo de proceso aceptable.
- ④ visualización de las imágenes estereoscópicas en color real.
- ④ interfaz con S.I.G con sobre imposición monoscópica y estereoscópica de elementos gráficos y con funciones de edición para modificar dichos elementos.
- ④ Impresoras de imágenes y trazadores gráficos para la impresión analógica de los Resultados.

6.5 EL PROCESO DE CAPTURA DE IMÁGENES.

Proceso cartográfico asociado. Las imágenes del objeto de interés deben ser capturadas y almacenadas para realizar las medidas fotogramétricas aplicando las transformaciones necesarias para pasar del espacio imagen al espacio objeto.

Este proceso tradicionalmente se ha basado en la captura de imágenes fotográficas, habitualmente dentro de la zona del visible o infrarrojo, utilizando un sistema de lentes y una película fotográfica en el plano focal para el registro de la proyección perspectiva del objeto.

Al respecto es importante tener en cuenta que la Fotografía es una técnica bien conocida, por lo que la integridad, estabilidad y longevidad de los registros fotográficos es controlable y predecible, siendo el único inconveniente el tiempo requerido para llevar a cabo el proceso fotográfico (revelado-fijado-secado-copiado) y la imposibilidad de modificación de la imagen una vez que se completa el proceso fotográfico.

Las primeras imágenes no fotográficas fueron obtenidas mediante el tubo de rayos catódicos en el año 1897, si bien hasta el 1923 no se perfeccionan las cámaras de tubo para la adquisición de las imágenes. La aparición y auge de la televisión a partir de la década de los años 30 extienden la utilización de este tipo de técnicas que no son utilizadas con fines cartográficos hasta mediados la década de los 50.

Estos sistemas eran muy delicados y vulnerables a modificaciones medioambientales y condiciones electromagnéticas, especialmente a las vibraciones, limitando su precisión y eficacia. En la década de los 70 aparecen los sistemas solid-state en los que la imagen es captada por la conversión de los

fotones en cargas eléctricas, en lugar de por una reacción química (proceso fotográfico) o por un cambio de resistividad (tubos de imagen).

La ventaja fundamental es que los elementos del sensor son discretos y están ensamblados en un soporte estable proporcionando una mayor precisión geométrica que la alcanzada por los sistemas de tubo de imagen, aunque hasta la década de los 80 no se generaliza su utilización para las cámaras de televisión y video doméstico, gracias a su menor costo, menor ruido, rango dinámico mayor y un excelente rendimiento comparado con otros sensores.

La aparición de estas nuevas tecnologías han dado lugar a una tendencia muy frecuente en todas las ciencias, el descubrimiento llega consigo una fuerte expectación inicial seguida de un largo periodo de investigación y desarrollo hasta que aparecen las primeras aplicaciones prácticas. Si estas aplicaciones se cubren con éxito la técnica crece rápidamente y se implanta de una forma definitiva.

La valoración del nivel de éxito está fuertemente ligada a la comparación de las técnicas equivalentes preexistentes.

En la actualidad, para la adquisición de imágenes digitales fotogramétricas son empleados dos procedimientos básicos:

- a) utilización de sensores digitales, o bien sensores analógicos dotados de un encoder analógico/digital.
- b) digitalización de imágenes analógicas adquiridas con cámaras fotográficas convencionales.

En la práctica, la primera opción está prácticamente limitada a aplicaciones de tipo no topográfico, basadas en la utilización de cámaras de video o cámaras digitales que permiten la realización de trabajos fotogramétricos en tiempo real.

Es indudable, que en un futuro más o menos cercanos las cámaras digitales irán sustituyendo a los métodos fotográficos convencionales y posterior digitalización, debido a las ventajas que incorpora la captación directa en formato digital aunque es necesario tener en cuenta que esa transición será compleja, puesto que las cámaras fotográficas son instrumentos que al alcanzado un importante grado de madurez y perfección de funcionamiento.

En la actualidad las cámaras métricas analógicas utilizadas suelen tener una distancia focal de 152mm y un formato de 230x230mm, registrándose la imagen de una forma instantánea en la película fotográfica, con una resolución práctica de aproximadamente 40 lp/mm (tamaño de pixel $\approx 10\mu\text{m}$) lo que implica unas necesidades de almacenamiento en vuelo difícilmente alcanzables con la tecnología actual. Así una imagen de 23x23cm tendría un tamaño de 23000x23000 pixels lo que resultaría un tamaño de fichero de la imagen digital de 500Mb (en 256 tonos de gris) o 1500Mb (en color real, 16.7 millones de colores).

Este volumen debe ser almacenado en el escaso tiempo disponible entre tomas que suele ser inferior a 10seg y necesitando un volumen suficiente teniendo en cuenta el número de tomas que se realiza en un vuelo.

Las cámaras digitales presentan las Siguietes ventajas:

1. Permiten la visualización en tiempo real.
2. Las imágenes son captadas en formato digital eliminando el proceso de digitalización, estas imágenes pueden ser rápidamente transmitidas para su procesamiento.
3. Permiten la captura en condiciones deficientes de iluminación.
4. Es posible la reutilización del soporte de almacenamiento.

En cuanto a sus inconvenientes se pueden señalar:

1. Se trata de una tecnología aún por desarrollar.
2. Se requiere mucho espacio de información para igualar a las cámaras convencionales (para igualar la velocidad de almacenamiento se necesitaría 1.2Gb cada 2 seg.).
3. El precio es elevado y existe escasa oferta.
4. La calidad de la imagen original marca definitivamente la calidad de los productos.
5. obtenidos, siendo factores claves en esta calidad la de la cámara utilizada en la toma de la imagen y la del escáner empleado en la transformación. Los escáneres fotogramétricos deben cumplir una serie de normas
6. toma de la imagen y la del escáner empleado en la transformación. Los escáneres fotogramétricos deben cumplir una serie de normas:
 - a) Geometría. Se debe obtener una precisión en la digitalización en torno a $\pm 2\mu\text{m}$, que es la alcanzada con los restituidores analvticos.
 - b) Resolución de la imagen. Debe ser posible alcanzar tamapos de pixel en torno a $10\mu\text{m}$ para las fotografías en blanco y negro y $15\mu\text{m}$ para las fotografías en color, si bien para ciertas aplicaciones se necesitan resoluciones incluso menores.
 - c) Ruido de la imagen. El ruido de una imagen fotográfica convencional viene dado por la granularidad de la película empleada, el objetivo debe ser introducir un nivel de ruido que se compense con el propio de la película, los niveles deben ser de $\pm 0.03-0.05D$ para $10\mu\text{m}$ para películas de resolución media.
 - d) Rango dinámico*. Se debe corresponder con el de las fotografías, es decir, 0.1 a 2.0D para fotografías en blanco y negro y 0.1 a 3.5D para fotografías en color
 - e) Color. Cada vez es más necesario que permita la captación de imágenes en color.

6.5.1 SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS DIGITALES.

El sistema fotogramétrico digital incluye todos los elementos necesarios tanto a nivel de software como de hardware para obtener los productos fotogramétricos a partir de las imágenes digitales, incluyendo también sistemas de captura de imágenes (interfaces de conexión con cámaras digitales o sistemas de digitalización de imágenes en formato analógico -escáner-) así como sistemas de impresión final (filmadoras, trazadores gráficos, impresoras de imágenes).

El elemento fundamental del sistema fotogramétrico digital es la estación fotogramétrica digital - Digital Photogrammetric Workstation- (conocido también como restituidor digital, si bien este nombre no es adecuado puesto que sólo hace referencia a una de las tareas de la estación, el proceso de restitución).

La tendencia actual de diseño de los sistemas fotogramétricos digitales es la utilización de una concepción modular ofreciendo grandes posibilidades para la expansión del sistema tanto a nivel de software como de hardware.

Además, cada vez es más frecuente la utilización de hardware estándar, dentro de las posibilidades debido a las características particulares de este tipo de sistemas, para conseguir por un lado, la compatibilidad con otros sistemas, facilitar las tareas de mantenimiento y la reducción de costes de los equipos.

Las peculiaridades más importantes de un restituidor fotogramétrico se encuentran en la interfaz con el usuario: necesidad de visión estereoscópica, obtención de coordenadas en tiempo real, precisión de medida a nivel de subpixel.

6.5.1.1. SISTEMA DE VISUALIZACIÓN.

La visualización en las estaciones fotogramétricas digitales se realiza mediante el empleo de monitores de alta resolución (siendo aconsejables resoluciones mínimas de 1280x1024) en color de 8 bit o bien en color real (24 bit) con posibilidad de sobre imponer elementos gráficos de forma no destructiva, por lo que se eliminan los sistemas ópticos de elevado coste y complicado mantenimiento que incorporan los sistemas analógicos y analíticos. La presentación de la imagen en un monitor permite unos primeros ajustes básicos, como, por ejemplo, brillo y contraste.

Para la realización de numerosas tareas fotogramétricas se requiere la visualización estereoscópica del modelo.

Esta visualización se obtiene mediante la separación de las imágenes. Dicha separación puede ser:

1. Espacial: Se presentan las dos imágenes que forman el modelo en una pantalla partida -split- o bien en diferentes monitores realizando la observación mediante un estereoscopio.
2. Temporal: Las imágenes se muestran alternativamente en la pantalla.
3. Radiométrica: Las imágenes reciben diferente tratamiento radiométrico en función de si se trata de la imagen izquierda o derecha (principio del anáglifo).
4. Combinaciones de los métodos anteriores.

	División de la pantalla	Pasiva(tektronix)	Activa(Crystaleyes)
Visión estéreo libre	NO	SI	SI
Observadores Múltiples	NO	SI	SI
Resolución de imagen	COMPLETA	1/2	1/2
Pantallas múltiples			
Posibilidad de utilizar otros programas de forma simultanea	SI, CON PANTALLAS MÚLTIPLES	SI, PERO REAL SOLO CON PANTALLAS MÚLTIPLES	NO SE DEBEN MEZCLAR VENTANAS MONO Y ESTÉREO

Tabla 6. 1 Sistemas de visión estereoscópica en restituidores digitales.

La técnica más empleada en la actualidad es la utilización de separación temporal y polarización en modo activo o pasivo (flicker).

En el caso de la polarización pasiva se instala una pantalla de polarización en el frente del monitor.

Las imágenes se presentan secuencialmente a una velocidad de 120 Hz y la pantalla de polarización cambia la polarización en sincronización con la presentación de las imágenes.

El operador utiliza gafas pasivas vertical y horizontalmente polarizadas.

En el caso del sistema activo la pantalla de polarización está incluida en las propias gafas utilizando un sistema de LCD (Pantalla de Cuarzo Líquido) en sincronización con el sistema mediante infrarrojos. En este último caso, el peso de las gafas es mayor debido a la necesidad de incorporar en las mismas la polarización LCD y la batería.

Las ventajas fundamentales de ambos métodos es que permiten la visualización estereoscópica de varios operadores de una forma simultánea sobre el mismo monitor, permitiendo el movimiento de la cabeza. Por otro lado, permiten la visualización de imágenes estereoscópicas y la súper imposición de elementos en color.

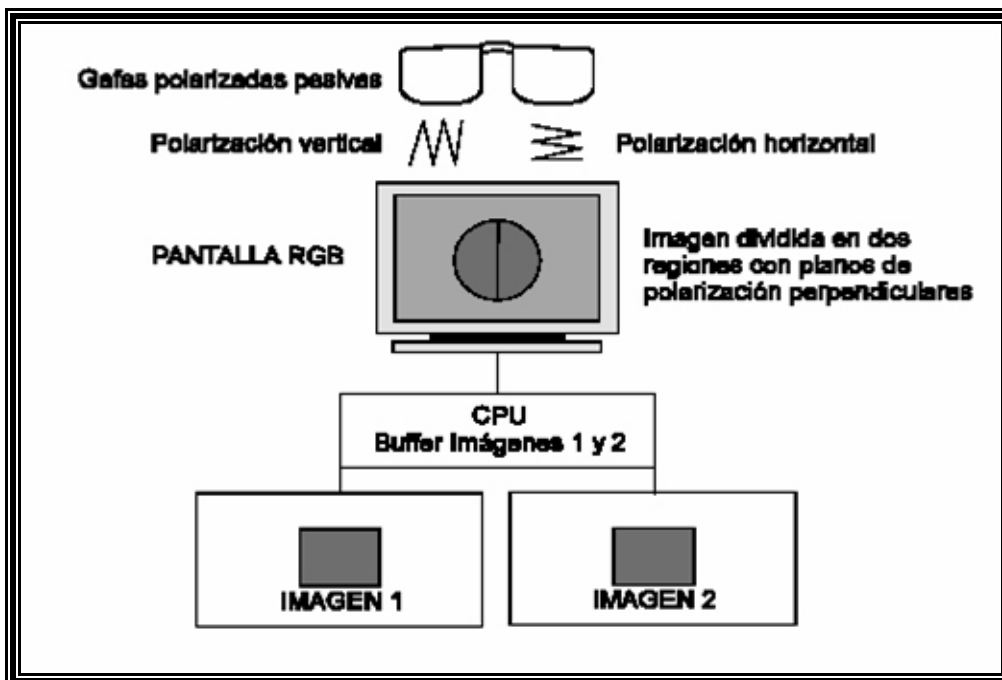


Figura 6. 14. Visión estereoscópica por polarización pasiva. Las imágenes se presentan alternativamente a una velocidad de 120Hz usando una pantalla de polarización. La visión se obtiene mediante la utilización de gafas pasivas (Schenk, 1995).

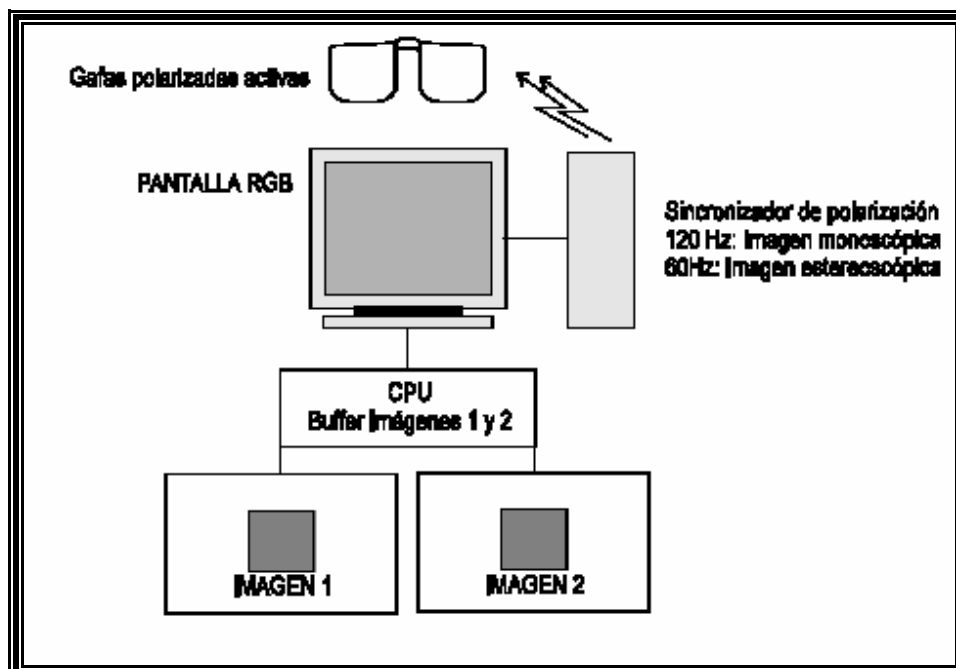


Figura 6. 15. Visión estereoscópica por polarización activa. Las imágenes se presentan alternativamente a una frecuencia de 120 Hz y la visualización se realiza mediante gafas activas sincronizadas con el sistema (Schenk, 1995).

La principal desventaja es la reducción del brillo en relación a un monitor normal debido a la doble frecuencia (120Hz frente a 60Hz) y la absorción de luz por la pantalla de polarización o el obturador LCD. Estos problemas se compensan mediante la utilización de monitores de fósforo muy rápido.

En el sistema de visión estereoscópica mediante imagen partida se instala un estereoscopio de espejos frente al monitor(es). La visualización se obtiene presentando la imagen izquierda en la mitad izquierda del monitor (o bien en el monitor izquierdo si se emplean dos monitores) y la derecha en su mitad correspondiente.

Esta técnica reduce la zona del modelo observable, pero proporciona un entorno muy familiar a los operadores habituados a los sistemas analógicos y analíticos y permite el empleo de monitores y tarjetas gráficas normales (60Hz).

Además permite la visualización de imágenes en color así como la superposición de elementos gráficos, si bien presenta el problema de que sólo es posible (al menos en primera medida) la observación de un solo operador de forma simultánea.

6.5.2. APLICACIONES.

- a) **Aerotriangulación** La Aerotriangulación es un buen ejemplo para demostrar el potencial de los sistemas digitales para la automatización del proceso fotogramétrico.

Tradicionalmente, la Aerotriangulación comenzaba con la preparación de los fotogramas realizando la selección de un considerable número de puntos que aparecieran en tantos fotogramas como fuera posible.

Tras esta etapa de preparación, los puntos seleccionados eran transferidos a todos los fotogramas, dependiendo en gran medida la calidad de los resultados de la calidad de esta transferencia de puntos.

Sólo después de que los puntos eran transferidos y claramente identificados en todos los fotogramas era posible comenzar el proceso de medida.

En los sistemas digitales la transferencia de los puntos se realiza de una forma automática mediante procesos de correlación de imágenes (multiple image matching).

Esta automatización permite aumentar considerablemente el número de puntos utilizados en la Aerotriangulación, así se pasa del número típico de 9 a 50, e incluso, 100 puntos por lo que se incrementa considerablemente la robustez de los resultados.

- b) **Generación automática de MDE** Una de las tareas en las que los sistemas digitales se muestran como más interesantes es la generación automática de MDE, siendo ésta una de las líneas de investigación que más esfuerzo han registrado en los últimos años y que, aunque siguen persistiendo ciertos problemas (líneas de ruptura de pendiente, oclusiones, zonas de bajo contraste, <) se pueden considerar los resultados como aceptables.
- c) **Producción de ortofotografías digitales.** En los últimos años se ha observado un fuerte incremento en la demanda de ortofotografías.

La generación de ortofotografías se simplifica considerablemente en el entorno digital, así el MDE empleado para la rectificación diferencial de la imagen es el derivado automáticamente que se puede considerar como bastante preciso en especial si se obtiene a partir de fotogramas de pequeña escala y el proceso se limita a eliminar los posibles desplazamientos debido al relieve y a la inclinación del fotograma.

CAPITULO 7.

LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

7.1. CARTOGRAFÍA DIGITAL.

Tradicionalmente la cartografía se ha representado sobre papel utilizando para su estudio todo el conjunto de técnicas introducidos en el capítulo I, por no existir otro medio mejor.

Esta cartografía, aunque muy adecuada para determinados usos por su facilidad de transporte y manejo, presenta ciertos inconvenientes:

- ④ Los datos originales se simplifican para hacer el mapa legible (generalización), de este modo muchos detalles locales se pierden;
- ④ Las áreas grandes quedan divididas entre varias hojas que, si han sido realizadas por diferentes autores presentarán información diferente en sus bordes.
- ④ Resulta complejo e inexacto combinar información de diferentes mapas, especialmente si están a diferente escala;
- ④ Se trata de documentos estáticos, ya que por su elevado coste tardan muchos años en ser actualizados, y fundamentalmente cualitativos ya que resulta difícil representar medidas cuantitativas salvo que se utilicen isolinias lo que implica una desratización importante de los valores;
- ④ Disparidad de criterios entre hojas y entre ediciones.

A mediados del Siglo XX se producen un conjunto de fenómenos que llevan al desarrollo de la cartografía digital:

- ④ Se incrementan tanto la demanda como la disponibilidad de datos espaciales y de técnicas para su análisis.
- ④ La necesidad de controlar los cambios acelerados que sufre la superficie terrestre debido a procesos de naturaleza dinámica convierten a los mapas en papel en herramientas completamente inadecuadas debido a su naturaleza estática.
- ④ El trabajo en diversas líneas de investigación básica y aplicada en ciencias de la Tierra y medioambientales suele requerir la combinación de varios mapas representando diferentes propiedades para una misma zona y en

diferentes períodos de tiempo, así como la incorporación de bases de datos temáticas.⁴⁶

- ④ El conjunto de desarrollos tecnológicos globalmente denominados *tecnologías de la información* han permitido manejar grandes volúmenes de datos espaciales a muy bajo coste.
 - ⊕ Desarrollo de herramientas de digitalización y automatización de la cartografía.
 - ⊕ Desarrollo de programas y herramientas destinados a la integración y análisis de la misma, especialmente los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G).
 - ⊕ Disponibilidad de información espacial a intervalos regulares de tiempo (imágenes de satélite).
 - ⊕ Reducción del coste del *hardware* (ley de Moore)⁴⁷ con lo que los S.I.G y la teledetección dejan de ser privativos de grandes centros de investigación o la administración.
 - ⊕ Aparición de CDs y desarrollo de internet con lo que desaparecen los costes de almacenamiento y distribución de información digital.

Las diferencias fundamentales entre cartografía en papel y cartografía digital son:

- ④ Mientras que la Cartografía en papel tiene un carácter estático, la Cartografía Digital es dinámica en el sentido de que es mucho más sencillo, tanto desde el punto de vista tecnológico como económico, su actualización.
- ④ La información debe estar perfectamente estructurada y sin ambigüedades para que los programas la puedan interpretar. Los ordenadores no pueden deducir la información eliminada o modificada por los procesos de generalización que puedan haberse utilizado. Un ejemplo habitual son las curvas de nivel cortadas para introducir una etiqueta de texto.
- ④ Se introduce el concepto de **capa** como fichero, o parte de un fichero, que contiene información espacial de una sola variable (en algunos casos un fichero puede almacenar varias capas). Se reserva el término **mapa** para

⁴⁶ Cuando se trabaja con S.I.G se suele hacer la distinción entre base de datos espacial y temática. La primera hace referencia al conjunto de mapas en formato digital (un mapa de términos municipales por ejemplo) y la segunda a las tablas que aportan variables no espaciales asociadas a las diferentes entidades representadas en la base de datos espacial (una tabla con información a nivel municipal).

⁴⁷ La capacidad de almacenamiento de los componentes de un ordenador se dobla cada 18 meses manteniéndose el precio aproximadamente constante.

una combinación de capas preparadas para su visualización o impresión. No debe mezclarse información de diferentes tipos en una misma capa.

Tres tipos de programas se han utilizado tradicionalmente para el manejo de datos espaciales:

- ④ Programas de CAD (Diseño Asistido por Ordenador). Permiten dibujar puntos, líneas y áreas en pantalla a partir de un sistema de coordenadas definido por el usuario. Se han utilizado sobre todo en arquitectura, ingeniería y diseño. Podían emplearse también, aunque de forma limitada, para hacer mapas.

Programas de cartografía automática. Programas para crear mapas en impresoras de texto utilizando diferentes caracteres para simbolizar diferentes entidades o valores de variables.

Programas para teledetección. Permitían generar mapas como nuevas imágenes obtenidas a partir de las imágenes originales captadas por el satélite. Hasta principios de la década de los noventa requerían hardware específico por la escasa potencia de los ordenadores personales.

Todos estos programas, junto con otros como los programas de gestión de bases de datos o las aplicaciones estadísticas, empiezan a converger a principios de los setenta hacia un nuevo tipo de aplicación informática, los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G) orientados a la codificación, gestión y cartografía de variables y entidades espaciales (Figura 7. 1).

Los S.I.G se han desarrollado por tanto a partir de la confluencia de conceptos, ideas, métodos de trabajo, terminología e incluso prejuicios aportados por profesionales procedentes de diferentes campos.

La interacción de estos profesionales ha supuesto que el desarrollo no haya seguido siempre la misma dirección y que aparezcan incluso perspectivas bastante diferentes de lo que es un S.I.G.

Por ejemplo, pensando en la importancia que se otorga al tiempo aparecerían en un extremo los cartógrafos y en el otro los ecólogos. Para los primeros el tiempo no tiene importancia⁴⁸ mientras que los segundos estudian procesos que ocurren en el espacio pero a una velocidad relativamente alta.

⁴⁸ La capacidad de almacenamiento de los componentes de un ordenador se dobla cada 18 meses manteniéndose el precio aproximadamente constante.

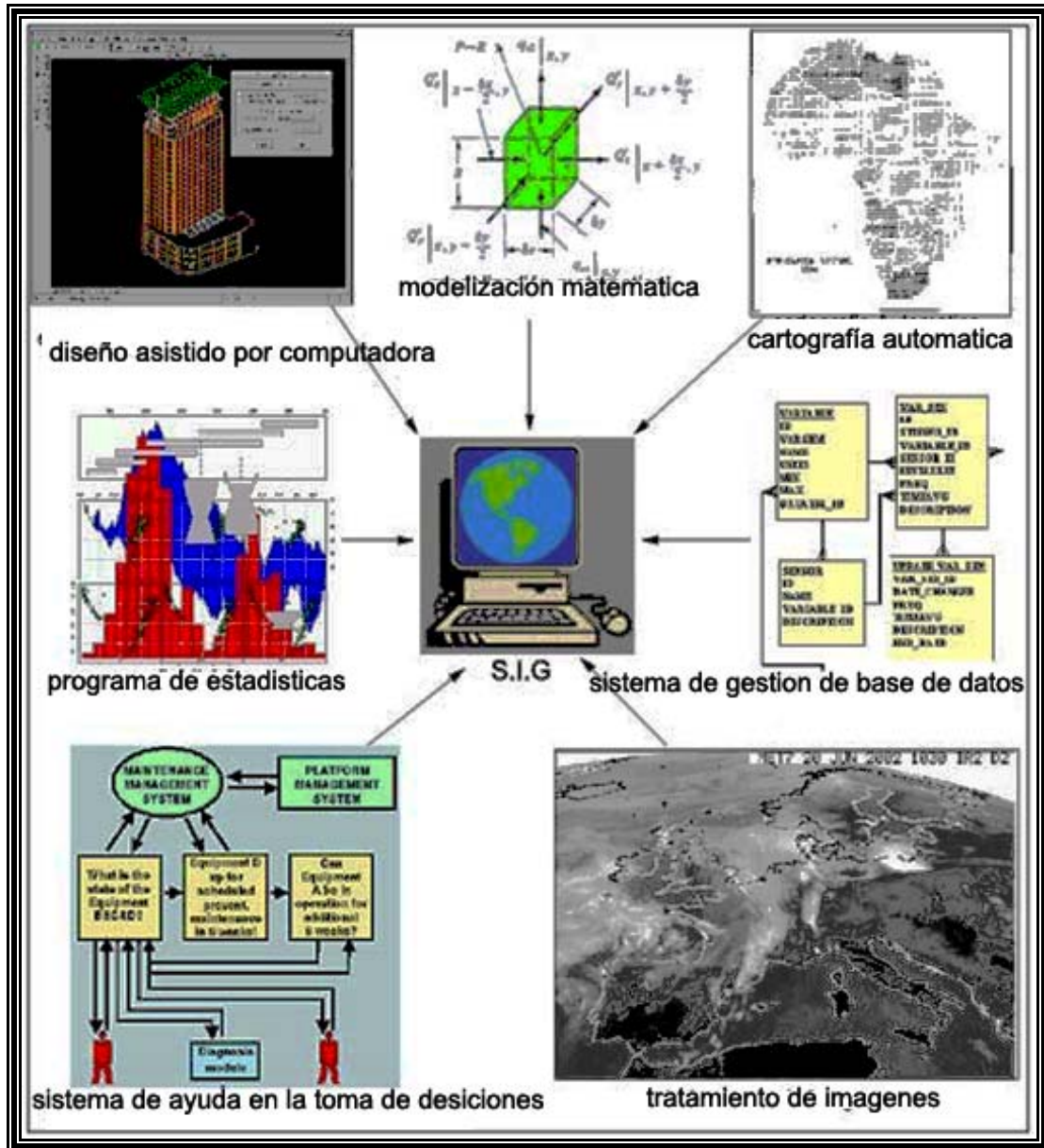


Figura 7. 1. Sistemas de información geográfica y su entorno.⁴⁹

⁴⁹ Fuente <http://www.merida.gob.mx/sig/>

7.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

En general, un *Sistema de Información* (SI) consiste en la unión de información en formato digital y herramientas informáticas (programas) para su análisis con unos objetivos concretos dentro de una organización (empresa, administración, etc.).

Un S.I.G es un caso particular de SI en el que la información aparece *georreferenciada* es decir incluye su posición en el espacio utilizando un sistema de coordenadas estandarizado resultado de una proyección cartográfica (generalmente U.T.M).

Cuando se habla de Sistemas de Información, suele pensarse en grandes sistemas informáticos que prestan apoyo a empresas u organismos de cierta envergadura.

Este apoyo implica:

El **almacenamiento** de la información relativa al capital de la empresa y a todas las transacciones,

Permitir la consulta de datos particulares con cierta facilidad y desde diferentes puntos,

Analizar estos datos para obtener un mejor conocimiento de las vicisitudes que atraviesa la empresa, Ayudar en la toma de decisiones importantes.

En el caso del Sistema de Información de una compañía aérea, el sistema de reserva y venta de boletos debe actualizarse constantemente para permitir la consulta al mismo desde cualquier punto de venta.

Toda esta información debe quedar almacenada para analizar la marcha de la compañía, cuantificar el impacto de determinados acontecimientos y apoyar decisiones como la compra de nuevos aparatos o la cancelación de vuelos.

Si pensamos en el S.I.G de una región, este contendrá información ambiental y socioeconómica de manera que podamos consultar las características de un determinado espacio o cuales son las aéreas que cumplen con el conjunto de criterios recomendables para, por ejemplo, instalar un parque eólico.

De este modo un S.I.G se convierte en una herramienta fundamental para llevar a cabo estudios de *Ordenación del Territorio* o *Evaluación de Impacto Ambiental*.

Más adelante se expondrán algunos ejemplos de consultas, análisis y tomas de decisión basados en S.I.G.

Podríamos considerar, en sentido amplio que un S.I.G está constituido por:

Bases de datos espaciales.

En las que la realidad se codifica mediante unos modelos de datos específicos.

Bases de datos temáticas.

Cuya vinculación con la base de datos cartográfica permite asignar a cada punto, línea o área del territorio unos valores temáticos.

Conjunto de programas.

Que permiten manejar estas bases de datos de forma útil para diversos propósitos de investigación, docencia o gestión.

Conjunto de ordenadores y periféricos

De entrada y salida que constituyen el soporte físico del S.I.G.

Estas incluyen tanto el programa de gestión de S.I.G cómo otros programas de apoyo. Debido a los requerimientos de velocidad, almacenamiento y memoria RAM de un S.I.G, generalmente es preferible destinar un ordenador en exclusiva a la implementación del S.I.G, bien sea actuando como servidor⁵⁰ o como computadora personal.

Comunidad de usuarios.

Que pueda demandar información espacial.

Administradores del sistema.

Encargados de resolver los requerimientos de los usuarios o bien produciendo nuevas herramientas.

⁵⁰ Se denomina servidor a una PC de gran potencia en el que diversos usuarios pueden trabajar de forma simultánea conectados desde varios ordenadores menos potentes denominados *terminales*.

7.3. BASES DE DATOS.

Desde el punto de vista de los datos, un S.I.G se basa en una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas variables, o bien capas que representan entidades (Figura 7. 2)⁵¹ a los que corresponden varias entradas en una base de datos enlazada. Estas capas corresponden, al menos en parte, a la misma zona, de manera que pueden analizarse en conjunto. De este modo puede combinarse, en un mismo sistema, información espacial y temática, con orígenes y formatos muy diversos.

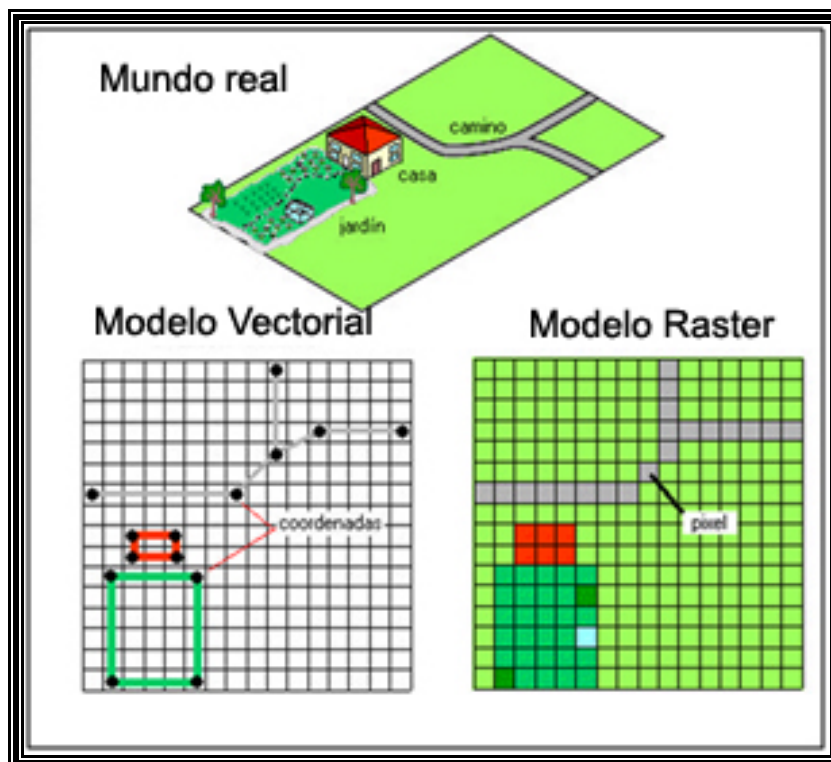


Figura 7. 2. Capas de información espacial.

De las diversas disciplinas que convergen en los S.I.G, la cartografía es una de las que tiene una contribución más relevante. Los S.I.G representan así una visión "cartográfica" del mundo apoyada en un espacio absoluto dotado de un sistema cartesiano de coordenadas obtenido a partir de un sistema de proyección. La fortaleza que supone el apoyo de la enorme tradición cartográfica implica también inconvenientes como el carácter estático y plano de los mapas y la incapacidad para reflejar el nivel de incertidumbre asociado a estos datos o la necesidad de unificar sistemas de proyección si los de las capas de información original son diferentes.

⁵¹ <http://www.esri-es.com/>

7.4 PROGRAMAS.

Desde el **punto de vista de los programas**, los Sistemas de Información Geográfica se han desarrollado a partir de la unión de diversos tipos de aplicaciones informáticas: la cartografía automática tradicional, los sistemas de gestión de bases de datos, las herramientas de análisis digital de imágenes, los sistemas de ayuda a la toma de decisiones y las técnicas de modelización física. Por ello tienden a veces a ser considerados un producto de las facultades de informática para ser usados por informáticos, sin embargo la fuerte carga teórica de los S.I.G exige al usuario conocimientos adecuados acerca de la *ciencia espacial* con la que está trabajando para escoger, en cada caso, las herramientas adecuadas a cada análisis en particular.

Las particularidades del manejo de datos espaciales, en buena parte común a todas las ciencias de la Tierra y ambientales, ha fomentado el uso del término *Ciencia de la Información Geográfica*. Por otro lado, para un experto en estas materias (ciencias de la tierra y ambientales) que desee introducirse en el manejo de los S.I.G, resulta imprescindible, lógicamente, una formación informática sólida.

Estas herramientas (programas) son muy variados hasta el punto de partir de distintas concepciones acerca de como entender y representar el espacio y los fenómenos en el ubicados. Estas diferencias reflejan diferentes tipos de teorías acerca del espacio procedentes de disciplinas científicas diversas; por tanto utilizar una determinada herramienta S.I.G para resolver un problema implica la aceptación, al menos implícita, de una teoría, una hipótesis, acerca de los datos que se manejan. Por ejemplo un mapa del pH del suelo puede hacerse de dos maneras:

- ④ Asignando a cada polígono que representa un tipo de suelo un valor de pH medio de dicho suelo
- ④ interpolando un conjunto de medidas de pH obtenidas en diferentes puntos Y cada una de ellas asume hipótesis completamente diferentes acerca de la variabilidad espacial de las propiedades edáficas.

Este problema está en el centro de los debates acerca de si los S.I.G deben considerarse tan sólo como una herramienta neutra o como una disciplina científica, debates con consecuencias profundas en el modo en que la docencia y práctica de los S.I.G debe plantearse en las universidades.

El desarrollo de los S.I.G no ha supuesto en realidad un cambio real en los modos de analizar la información.

Gran parte de los algoritmos utilizados se conocían desde antes de la aparición de la PC y simplemente era inviable hacer los cálculos a mano. De hecho el progresivo aumento en la potencia de las computadoras hace que cada cierto tiempo se incorporen nuevas técnicas ya conocidas pero más exigentes en cuanto

a potencia del ordenador que las disponibles hasta el momento.

Pero hay que tener en cuenta que la utilización de grandes computadoras y herramientas sofisticadas no garantiza tampoco la calidad de los resultados. Sólo con buenos datos de partida, un modelo de datos adecuado a los mismos y técnicas de análisis también adecuadas podrá obtenerse buenos resultados.

Uno de los errores más comunes cuando alguien se inicia en el uso de los S.I.G es confundir el manejo de un programa con el dominio de una técnica. Igual que no es lo mismo saber estadística que saber pulsar los botones de funciones estadísticas de una calculadora, tampoco es lo mismo conocer las técnicas S.I.G que saber manejar un determinado programa y obtener salidas gráficas más o menos estéticas. De hecho, aunque una de las primeras percepciones que se tienen de un S.I.G son las salidas gráficas a todo color, impresas o en la pantalla de un ordenador; conviene recordar que hay una diferencia fundamental entre los programas de manejo de gráficos y los S.I.G. En los primeros, lo fundamental es la imagen que vemos, siendo irrelevante como se codifique, en un S.I.G la imagen es sólo una salida gráfica sin mayor importancia, lo relevante son los datos que se están representando y el análisis de los mismos.

Aunque en sentido estricto no sería necesario, se han desarrollado un tipo específico de aplicaciones informáticas para el manejo de un S.I.G. Estos programas es lo que popularmente se conoce cómo S.I.G (IDRISI, ArcInfo, GRASS, Erdas, etc.), pero que realmente constituyen tan sólo un componente de lo que es realmente un Sistema de Información Geográfica.

7.5. USUARIOS.

Los SI (sistemas de información), o en concreto los S.I.G, de la envergadura de los aquí planteados están al servicio de una estructura organizativa, tienen una gran número de usuarios con diferentes niveles de acceso, administradores del sistema y personal responsable de tomar decisiones en función de los informes aportados por el Sistema. Por tanto, salvo casos triviales como el de un S.I.G personal desarrollado para hacer un trabajo personal, los aspectos administrativos se convierten, junto a las bases de datos y las herramientas informáticas para su análisis, en el tercer pilar de un S.I.G.

Debido a la complejidad y a la utilidad de este tipo de sistemas resulta importante distinguir entre tres formas de interacción con el S.I.G:

- 🌐 **Usuarios**, su misión es obtener información del S.I.G y tomar decisiones en función de la misma. Suelen necesitar una interfaz de usuario sencilla para enmascarar la complejidad del sistema debido a la falta de conocimientos informáticos.

- ④ **Técnicos en S.I.G**, encargados de seleccionar las herramientas, los datos, la escala adecuada de representación para los fines propuestos para el Sistema, y los procedimientos para su introducción en el S.I.G. Suele ser preferible que tengan formación y experiencia en el campo de las ciencias de la Tierra y Medioambientales, especialmente en el campo más relacionado con los objetivos que se quieren cubrir con el S.I.G.
- ④ **Informáticos**, en sistemas de cierta importancia, son los encargados de su administración. Esto incluye modificar o incluso crear desde cero las herramientas que contiene el S.I.G para adaptarlas a los requerimientos de los usuarios cuando estos no puedan ser llevados a cabo por los técnicos en S.I.G a partir de las herramientas disponibles en el sistema.

Esta división puede difuminarse de forma considerable en los diferentes casos reales.

Debido a la imparable implantación de los S.I.G como herramienta de análisis y gestión de datos espaciales el número de usuarios de S.I.G (no siempre voluntarios) crece enormemente. Por otro lado la necesidad de basar ciertas decisiones políticas en los resultados de un S.I.G ha llevado a algunos gestores a interesarse por estos programas.

Estos nuevos usuarios, con bastantes menos conocimientos informáticos que los usuarios tradicionales, no tienen necesidad de un programa altamente sofisticado sino que simplemente necesitan visualizar y consultar cómodamente información espacial. Para cubrir esta necesidad han aparecido programas sencillos (ArcView, Idrisi) pero menos potentes que los S.I.G tradicionales (ArcInfo, GRASS). A raíz de estos hechos, se ha abierto cierta polémica entorno a la aparente contradicción entre programas de gran potencia y flexibilidad pero difícil manejo y programas sencillos pero menos potentes. Quizás la solución habría que buscarla en el mundo de las bases de datos. Una base de datos potente (Oracle, Postgresql, SQL server) distingue entre:

- ④ La **base de datos** en si, como conjunto de ficheros que almacenan la información.
- ④ El programa **servidor de bases de datos** que recibe las consultas de los usuarios y accede a la base de datos
- ④ Los programas **clientes de bases de datos** son programas sencillos que permiten al usuario escribir consultas, las lanzan al servidor, reciben la respuesta de este y presentan los resultados al usuario.

Los usuarios acceden a la base de datos a través de programas clientes, estos se comunican con el programa servidor que analiza sus consultas y suministra sus resultados. Los programas clientes pueden ser más o menos complejos en función de las necesidades del usuario, puede tratarse de un simple visualizador de tablas o de un cliente con capacidad para hacer consultas y modificaciones complejas a la base de datos.

7.6 UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Las funciones básicas, y más habitualmente utilizadas, de un S.I.G son el almacenamiento, visualización, consulta y análisis de datos espaciales. Un uso algo más avanzado sería la utilización de un S.I.G para la toma de decisiones en ordenación territorial o para la modelización de procesos ambientales.

7.6.1. ALMACENAMIENTO.

El primer problema que se plantea al trabajar con un S.I.G es el como codificar y almacenar los diferentes fenómenos que aparecen en la superficie terrestre. El primer paso para conseguirlo es desarrollar modelos de datos adecuados. Es decir, el almacenamiento de datos espaciales implica modelizar la realidad y codificar de forma cuantitativa este modelo. Los temas 3, 4 y 8 tratarán con cierta profundidad los diversos aspectos de la modelización y el almacenamiento de datos espaciales.

7.6.2 VISUALIZACIÓN.

La diferencia básica entre un Sistema de Información en sentido amplio y un S.I.G es que este último maneja datos espaciales.

Estos se presentan en un espacio de cuatro dimensiones (3 espaciales y el tiempo) pero debido al peso que la tradición cartográfica tiene sobre los S.I.G, una de las formas prioritarias de presentación de los datos es en su proyección sobre el espacio bidimensional definido mediante coordenadas cartesianas.

Hoy en día están apareciendo un gran número de programas sencillos que se centran en la visualización y consulta de datos espaciales, lo que se conoce como *desktop mapping*, que es un complemento a los S.I.G más que S.I.G en si mismo.

Sin embargo gran parte de la popularización de los S.I.G se debe a este tipo de aplicaciones ya que han permitido introducir la dimensión espacial de la información de forma sencilla en entornos de trabajo en los que no existía una tradición a este respecto (empresas por ejemplo).

7.6.3 CONSULTAS.

Un paso adelante sería la obtención de respuestas a una serie de *consultas* sobre los datos y su distribución en el espacio. Una consulta a una base de datos implica:

- ④ Seleccionar el subconjunto de datos que el usuario necesita en función de un conjunto de criterios previamente definidos. Por ejemplo todos los municipios con una población mayor de 30000 habitantes.
- ④ Presentarlo al usuario de forma útil bien sea tablas (con listados de los municipios ordenados según diversos criterios), gráficos o mapas en los que los municipios de más de 30000 habitantes aparezcan de un determinado color. Las tablas dan una información más exacta, pero los mapas presentan sobre las tablas la ventaja de que aportan información espacial.

En un Sistema de Información convencional o en una base de datos, las consultas se basan en propiedades temáticas.

En un S.I.G las consultas se basan tanto en atributos temáticos como en propiedades espaciales, estas pueden definirse mediante un par de coordenadas o pinchando directamente sobre un mapa.

El lenguaje de consulta más utilizado en programas de gestión de bases de datos es SQL (Lenguaje Estructurado de Consultas). Sus resultados son tablas, sin embargo estas tablas pueden combinarse con capas de información espacial preexistentes para obtener, como presentación, una nueva capa.

Los tipos básicos de consulta a un S.I.G serían:

- ④ ¿Que objeto aparece en el punto de coordenadas X e Y?
- ④ ¿Cuales son los valores de las variables V_1, V_2, \dots en dicho punto?
- ④ ¿Que puntos cumplen una determinada condición? Por ejemplo tener una pendiente inferior al 5% y no estar cultivados.
- ④ ¿Que entidades cumplen una determinada condición? Por ejemplo cuantos embalses de la Cuenca de una presa superan el 50% de su capacidad.
- ④ ¿Que relación hay entre los objetos A y B? Por ejemplo, ¿Cual es la distancia entre dos puntos?
- ④ ¿Cual es la conexión entre dos puntos? Por ejemplo, ¿Cual es la mejor ruta entre dos poblaciones?

7.6.4 ANÁLISIS.

Más sofisticado sería el uso de herramientas de *análisis espacial* y *álgebra de mapas* para el desarrollo y verificación de hipótesis acerca de la distribución espacial de las variables y objetos.

- 🌐 ¿Disminuye la temperatura con la altitud?
- 🌐 Los individuos de una determinada especie vegetal, ¿tienden a agruparse o permanecen aislados?

- 🌐 ¿Cual es el tamaño mínimo de un área de bosque para mantener una población viable de alguna especie animal?

En algunos casos (los dos primeros ejemplos) resulta necesaria la utilización de programas de análisis estadístico externo a los programas de S.I.G, debe buscarse entonces la mayor integración posible entre ambos tipos de programas en cuanto a tipos de datos manejados y compatibilidad de formatos de ficheros. En otros casos se tratará de implementar modelos ya formulados apoyados en el conocimiento de expertos bien en comunicación directa o bien a través de una búsqueda bibliográfica (es el caso del tercer ejemplo).

A partir de los resultados de este tipo de análisis se puede, en algunos casos, generar nuevas capas de información. Por ejemplo, una vez determinada la relación entre temperatura y altitud, puede generarse una capa de temperaturas a partir de una capa de elevaciones mediante técnicas de *modelización cartográfica*.

7.6.5 TOMA DE DECISIONES.

Un punto más allá de sofisticación sería la utilización de un S.I.G para resolver problemas de *toma de decisión* en planificación física, ordenación territorial, estudios de impacto ambiental, etc. mediante el uso de instrucciones complejas del análisis espacial y álgebra de mapas. En definitiva se trataría de resolver preguntas del tipo:

- 🌐 ¿Que actividad es la más adecuada para un área concreta? Por ejemplo cual es el uso del suelo más adecuado para una parcela concreta teniendo en cuenta una serie de criterios basados en variables espaciales de las que se cuenta con capas de información.
- 🌐 ¿Cual es el mejor lugar para la instalación de determinada actividad deseada (un centro de ocio) o indeseada (un vertedero)?
- 🌐 ¿Cual es la forma y tamaño adecuados de los espacios naturales para cumplir con sus funciones (por ejemplo la conservación de biodiversidad)?
- 🌐 ¿Cual es la ubicación óptima de una red de torres de vigilancia forestal?

7.6.6 MODELIZACIÓN.

Finalmente, las aplicaciones más elaboradas de los S.I.G son aquellas relacionadas con la integración de modelos matemáticos de procesos naturales, dinámicos y espacialmente distribuidos.

Los objetivos perseguidos pueden ser tanto científicos como de planificación y ordenación. Por ejemplo:

- ④ ¿Que áreas pueden inundarse en caso de producirse un episodio lluvioso dado?
- ④ ¿Que consecuencias ambientales puede tener un embalse aguas abajo de su ubicación?
- ④ ¿Cómo podría mejorarse la eficiencia en el uso del agua?
- ④ ¿Cual va a ser el impacto sobre el medio de dicha actividad?

En estos casos los S.I.G deben integrarse con un modelo dinámico, esta integración puede llevarse a cabo de varios modos:

- ④ El S.I.G se utiliza sólo para crear las capas de entrada al modelo y visualizar las de salida.
El modelo se implementa en un programa aparte que importa y exporta los formatos de fichero del S.I.G. Ambos programas son totalmente independientes. Un ejemplo de funcionamiento similar sería el caso de una hoja de cálculo cuyo contenido se grabara en formato de texto (*.txt) y este fichero se leyera con un procesador de textos para su incorporación en un documento.
- ④ Ambos programas se integran más estrechamente compartiendo el mismo formato de ficheros y pudiendo ejecutarse al mismo tiempo. Por ejemplo los diferentes programas de una *suite* ofimática.
- ④ El modelo se incorpora como un módulo del S.I.G. Sería el caso de un procesador de textos que incorporara una pequeña aplicación de hoja de cálculo para incorporar, y trabajar con, tablas en el documento.

7.7. APLICACIONES DE LOS S.I.G.

Un Sistema de Información Geográfica es una herramienta que permite la integración de bases de datos espaciales y la implementación de diversas técnicas de análisis de datos. Por tanto cualquier actividad relacionada con el espacio, puede beneficiarse del trabajo con S.I.G. Entre las aplicaciones más usuales destacan:

Científicas

- ✦ Especialmente en ciencias medioambientales (en sentido amplio) y relacionadas con el espacio.
- ✦ Desarrollo de modelos empíricos, por ejemplo los que relacionan temperatura con altitud, orientación, etc. a partir de medidas tomadas en el lugar.
- ✦ Modelización cartográfica (aplicación de modelos empíricos para hacer mapas de temperatura a partir de mapas de altitud, orientación, etc.)
- ✦ Modelos dinámicos (utilización de las leyes de la termodinámica y la dinámica de fluidos para hacer un mapa de temperatura utilizando un mapa de elevaciones, entre otros, como *condiciones de contorno*).
- ✦ Teledetección, las imágenes de satélite son estructuras raster que se manejan de forma óptima en un S.I.G

Gestión

- ✦ Cartografía automática
- ✦ Información pública, catastro
- ✦ Planificación de espacios protegidos
- ✦ Ordenación territorial
- ✦ Planificación urbana
- ✦ Estudios de impacto ambiental
- ✦ Evaluación de recursos
- ✦ Seguimiento de las consecuencias de determinadas actuaciones (presas, diques, carreteras).

Empresarial

- ✦ Marketing (envío de propaganda a los residentes cerca del local que cumplan determinadas condiciones)
- ✦ Estrategias de distribución (optimización de las rutas que una flota de camiones debe realizar par distribuir mercancía desde varios almacenes a varios clientes)
- ✦ Localización óptima de una sucursal en función de los clientes potenciales situados alrededor.

7.8 INFRAESTRUCTURAS DE DATOS ESPACIALES.

A pesar de la utilidad de los S.I.G, no resulta fácil ponerlos en marcha, siendo uno de los principales problemas el elevado coste de adquisición y mantenimiento de la información espacial. Las dificultades en el acceso a esta conllevan varios problemas:

Duplicación de esfuerzo

Duplicación de bases de datos, no siempre coherentes

Diseminación de copias más o menos legales de los datos pero muchas veces sin la necesaria meta información.

Varias organizaciones han impulsado la creación de **Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)** para facilitar la explotación y el intercambio de datos espaciales. Estas infraestructuras definen una serie de normas y estándares que los productores de datos espaciales (generalmente organismos públicos) deben seguir.

La Comisión Europea publicó en 1999 un informe acerca de la necesidad de crear formatos y servicios de metadatos para facilitar el intercambio, búsqueda y recuperación de los mismos.

Posteriormente la Comisión promovió la iniciativa INSPIRE (Infraestructura para la Información Espacial en Europa) en colaboración con los estados miembros. Se trata de incentivar la creación de una IDE europea que proporcione a los usuarios la posibilidad de identificar y acceder a la información espacial en base a los siguientes principios:

- ④ Los datos básicos deben recogerse una vez y debe mantenerlos el centro que lo pueda hacer de forma más eficaz.
- ④ Debería ser posible combinar fácilmente información espacial de distintas fuentes europeas.
- ④ La información recogida a un nivel debe ser compartida entre distintos niveles.
- ④ La información espacial debería ser abundante y estar disponible de forma que no se frene su uso masivo.
- ④ Debería ser fácil descubrir que información geográfica está disponible.
- ④ Los datos geográficos deberían ser fáciles de entender e interpretar y poder ser visualizados adecuadamente.

El objetivo final es que los diferentes organismos productores de información espacial contaran con servidores de mapas vía web de manera que el usuario pueda utilizando un programa cliente web:

- 🌐 Visualizar la información espacial disponible con diferentes niveles de zoom, quitando y poniendo capas de información, etc.
- 🌐 Cargar información disponible en diferentes servidores de forma transparente.
- 🌐 Bajar, si lo necesita, la información que esta visualizando.

El primero de estos objetivos es hoy plenamente factible. Existen diversos servidores de mapas disponibles, algunos de ellos muy conocidos:

- 🌐 Sitna (<http://sitna.tracasa.es/>)
- 🌐 National geographic *Mapmachine*
- 🌐 (<http://plasma.nationalgeographic.com/mapmachine/>)
- 🌐 Google Earth
- 🌐 Google maps (<http://maps.google.com/>)

El segundo de estos objetivos implica un gran esfuerzo técnico de cara a garantizar la interoperabilidad de los datos, es decir que dos mapas procedentes de dos organismos diferentes puedan utilizarse juntos. Para ello se necesita:

Descripción adecuada de los metadatos para determinar por ejemplo si dos mapas tienen una proyección compatible y cuales son las ecuaciones de transformación entre ellas.

Interoperabilidad semántica, las leyendas deben ser comunes y utilizar los mismos términos para decir las mismas cosas.

Una correcta política de actualización de los datos y mantenimiento de las versiones antiguas. Para reducir costes, sólo se debería actualizar aquellas partes que realmente se han modificado y mantener las versiones antiguas para estudios históricos.

El tercer objetivo es técnicamente factible pero puede contar con una amplia oposición política, existe aún un cierto rechazo al hecho de compartir información medioambiental, a pesar de todas las directivas de la UE acerca de información medioambiental pública.

7.9 EL SISTEMA GPS.

Uno de los problemas fundamentales de la cartografía ha sido siempre el conseguir de forma precisa determinar la posición en el espacio de los fenómenos a cartografiar. Tradicionalmente se han utilizado técnicas de topografía basadas en la triangulación. Hoy en día se cuenta con el sistema GPS que permite determinar las coordenadas de cualquier punto de la superficie terrestre con mayor precisión que los antiguos métodos topográficos.

La tecnología GPS (Global Positioning System) fue diseñada originalmente con propósitos militares pero rápidamente se vio su aplicabilidad en el mundo civil, fundamentalmente en navegación y topografía.

El sistema consta de tres componentes:

- 🌐 **Componente espacial**, formado por 24 satélites situados a unos 20200 km de la Tierra y que pasan por el mismo lugar cada 12 horas de manera que se puede contar en cualquier lugar y en cualquier momento con, al menos, 4 de estos satélites con un ángulo de elevación de por lo menos 15°.
- 🌐 Cada satélite lleva a bordo varios relojes atómicos de gran precisión y emiten constantemente una señal característica de cada satélite que contiene entre otras cosas la posición del mismo.
- 🌐 **Componente de control**, formado por una serie de estaciones de observación cercanas al Ecuador encargados de controlar la posición orbital de los satélites y calibrar y sincronizar los relojes.
- 🌐 **Usuarios con un receptor GPS** entre las actividades la navegación marítima o terrestre, excursionismo, topografía, control de maquinaria, etc.

Dependiendo de las necesidades existen tres modos de utilización de un dispositivo GPS:

- 🌐 **Navegación autónoma** con un receptor simple, la precisión es de 20 metros para usuarios militares y 100 metros para usuarios civiles. Utilizado en navegación marina.
- 🌐 **Posicionamiento diferencial corregido (DGPS)** con precisiones de 0.5 a 5 metros utilizado en S.I.G, navegación costera, posicionamiento de vehículos, etc.
- 🌐 **Posicionamiento diferencial de fase** con precisiones entre 0.5 y 20 mm, utilizado en control de maquinaria y topografía.

El cálculo del posicionamiento se basa en la medición de la distancia desde la posición de cada satélite a Tierra. Puesto que la señal emitida por el satélite incluye la hora en que fue emitida y el receptor conoce la hora de llegada, la distancia se puede calcular como:

$$d = c \Delta t$$

Donde: c es la velocidad de la luz.

Se genera de este modo una pseudoesfera con centro en el satélite y radio igual a la distancia medida. Si se dispone de tres satélites se tienen 3 pseudoesferas cuya intersección genera un único punto que es la posición del receptor. Sin embargo para obtener una medida hacen falta al menos cuatro satélites debido a las diferencias temporales en la recepción de las señales de los satélites.

Las distancias medidas por un receptor GPS están sujetas a las siguientes fuentes de error:

- ⊕ Retrasos atmosféricos sobre la señal;
- ⊕ Errores en los relojes;
- ⊕ Efecto multitrayectoria, la señal puede llegar al receptor rebotada desde alguna superficie reflectora (láminas de agua, edificios) obteniéndose una medida de distancia errónea;
- ⊕ Pérdida de precisión debido a que los satélites están muy juntos. Un receptor GPS puede proporcionar una medida de esta pérdida tanto en la horizontal (HDOP) como en la vertical (VDOP);
- ⊕ Disponibilidad selectiva, distorsiones introducidas a propósito por el ejército americano para disminuir la precisión a los usuarios civiles o a países extranjeros. Los satélites del sistema GPS disponen además de una señal, que permite posicionamiento de alta precisión, pero que es sólo accesible a aplicaciones militares.

La técnica **DGPS** permite solventar muchos de estos errores alcanzándose precisiones de 2 a 3 metros. Se basa en la conexión del receptor a un receptor de referencia fijo. Este último, puesto que conoce su posición, puede calcular el error de la señal del GPS y transmitirlo al receptor móvil para que lo corrija.

Esta corrección puede realizarse en tiempo real o en pos proceso mediante programas que descargan por internet los ficheros con los errores y los tiempos en que se han medido estos errores para corregir las posiciones medidas por el receptor móvil y almacenado en otro fichero.

La técnica de Posicionamiento diferencial de fase requiere como mínimo dos receptores que deben utilizarse de forma simultánea para, tomar varias medidas, conseguir una reducción de errores mediante procedimientos estadísticos.

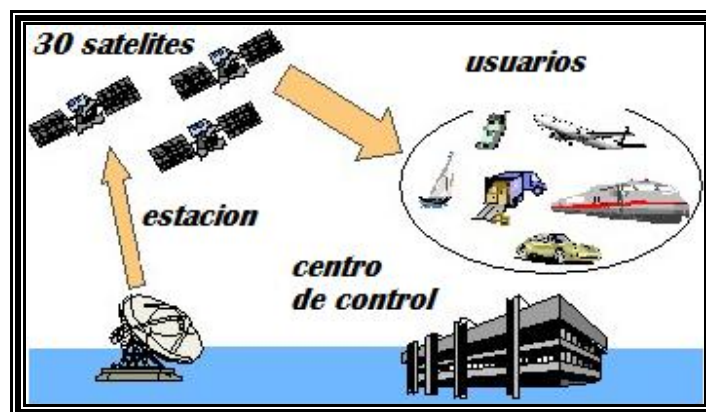


Figura 7. 3. Funcionamiento de GPS⁵²

7.10. LOS S.I.G ¿CIENCIA O HERRAMIENTA?

Uno de los debates más habituales en la utilización de los Sistemas de Información Geográfica en entornos académicos es hasta que punto implican realmente un avance científico, con lo que su presencia como asignatura sería de pleno derecho, o si son sólo una herramienta, poco más que un procesador de textos, que los alumnos deberían aprender por su cuenta y que, como mucho, podría servir para explicar visualmente otros contenidos.

En realidad, con los S.I.G ocurre algo parecido a lo que ocurre con la estadística. Existen los programas de estadística, o incluso las calculadoras estadísticas, que son útiles siempre y cuando el usuario tenga los conocimientos de la ciencia estadística necesarios para aplicar el método que necesita con éxito. De esta manera puede distinguirse, como de hecho se viene haciendo en la bibliografía, entre Sistemas de Información Geográfica y Ciencia de la Información Geográfica (en inglés el acrónimo es el mismo).

Se hace por tanto necesario determinar cual sería el ámbito de estudio de esta *Ciencia de la Información Geográfica* que tiene poco que ver en realidad con la Geografía, al menos con la concepción tradicional de esta; sino que sería el conjunto de problemas vinculados con la distribución espacial de variables (la temperatura por ejemplo), entidades (los individuos de una especie vegetal por ejemplo) y fenómenos (la erosión por ejemplo) sobre la superficie terrestre.

Estos fenómenos son estudiados por la Geografía, Edafología, Ecología, etc. pero

⁵² . http://www.asifunciona.com/electronica/af_gps/af_gps_10.htm

su distribución espacial presenta características comunes y dificultades específicas que dan su unidad a la *Ciencia de la Información Geográfica*.

La cuestión básica está en la necesidad y dificultad de modelizar la superficie terrestre para resolver, utilizando un ordenador y un programa o un conjunto de programas, determinados problemas científicos o de orden práctico que afectan a dicha superficie terrestre. Para ello es necesario:

- ④ **Modelos de datos.** Se trata de modelos de las entidades y variables que aparecen en la superficie terrestre y que permitirán codificarlos en un sistema informático.
- ④ **Modelos de procesos.** Se trata de procedimientos de cálculo que representan la interacción de los diferentes elementos de la superficie terrestre y sus modificaciones.

Por ejemplo, una cuenca hidrográfica y su red de drenaje pueden representarse en un ordenador mediante una serie de números almacenados en ficheros Siguiendo diversos modelos de datos ampliamente utilizados (que se verán en los Siguientes temas).

El proceso de generación de avenidas e inundaciones en dicha cuenca puede modelizarse mediante programas que toman como entrada los ficheros que definen la cuenca, los que definen la precipitación, etc. y generan ficheros de salida que pueden representar la superficie inundada, hidrogramas, etc.

La adecuada codificación de elementos y procesos es la base de la Ciencia de la Información Geográfica que, podría considerarse que esta a caballo entre la Geografía y la Informática.

En la actualidad aparecen tres grandes líneas de trabajo en el mundo de los S.I.G:

- ④ Cartografía de alta resolución, ligada a la topografía clásica con objetivos aplicados en el campo de la arquitectura o las ingenierías.
- ④ Modelización de procesos ambientales y técnicas de simulación de fenómenos extremos o de actuaciones concretas sobre el espacio.
- ④ S.I.G y Tecnologías de la Información, para permitir acceder a un S.I.G con todas las posibilidades a través de Internet; entre las aplicaciones de esta línea está la educación ambiental o la publicidad y otras aplicaciones empresariales.

CAPÍTULO 8.

MODELOS Y ESTRUCTURAS DE DATOS.

8.1 INTRODUCCIÓN.

La función de cualquier programa informático es ejecutar un conjunto de instrucciones, escritas en un lenguaje formal capaces de manipular símbolos que representan algún tipo de situación del mundo real; en el caso de un S.I.G objetos y variables espaciales. El ser humano es capaz de desenvolverse sin mayores problemas a pesar de que su conocimiento del mundo es ambiguo e incompleto; no ocurre lo mismo con los ordenadores, las descripciones de la realidad que manejan no deben contener ambigüedad alguna. Por tanto los lenguajes formales Siguen estrictas reglas lógicas y asumen un conocimiento preciso de las situaciones del mundo real que se simbolizan.

Un buen ejemplo de esto es el de las curvas de nivel cortadas para insertar el texto que describe su altitud (Figura 8. 1).

Esta opción es adecuada para un mapa en papel que debe interpretar un usuario humano, pero un ordenador interpretara que las curvas se han cortado y que existen otras *curvas pequeñas* que generan patrones extraños. Por otra parte para que el ordenador procese adecuadamente estas curvas, su altitud debe integrarse como una variable enlazada al objeto y no como un rótulo escrito al lado.

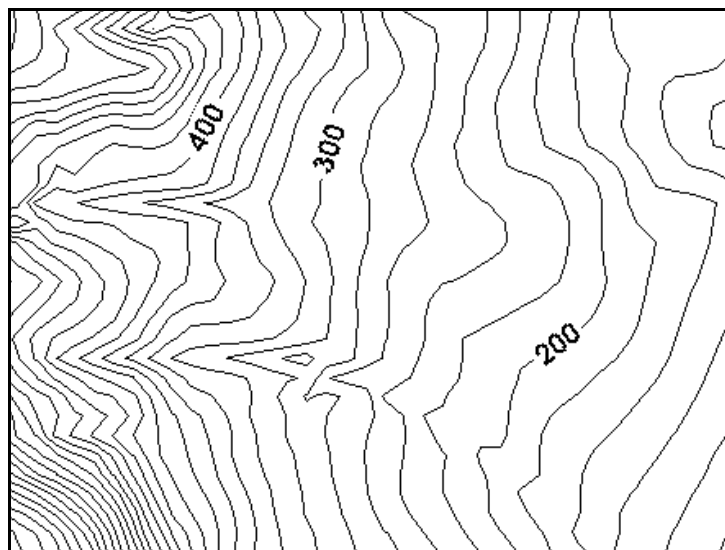


Figura 8. 1. Curvas de nivel.

En S.I.G, al margen de asignar a cada punto de la superficie un par de coordenadas Siguiendo un sistema de proyección, debemos definir, formalmente, *estructuras de datos* (conjunto finito de datos discretos y fácilmente manipulables con un ordenador) que representen entidades y variables y las *instrucciones* que utilizará el ordenador para manipular estas estructuras de datos. Se trata en definitiva de un problema de lenguaje. En este tema se tratará la base teórica de la codificación de los diferentes elementos y atributos de la superficie terrestre en formato digital para su tratamiento con un programa S.I.G.

Por ejemplo, en el Sistema de Información de una empresa, los distintos trabajadores se codificarían mediante estructuras de datos similares a esta:

```
Trabajador {
    Nombre (80 caracteres)
    NIF (9 caracteres)
    Dirección (120 caracteres)
    Edad (número entero)
    Año de contratación (número entero)
    Categoría (20 caracteres)
}.
```

De manera que toda la información relevante queda codificada mediante elementos simples (cadenas de caracteres y números enteros). Las instrucciones deberían permitir responder a consultas como obtener el número de trabajadores que llevan más de 20 años en la empresa.

Partiendo de la definición de modelo como representación simplificada de la realidad, que refleja lo fundamental de esta ignorando los detalles accesorios, en informática se denomina *modelo de datos* al conjunto de reglas utilizadas para representar las diferentes entidades que deben almacenarse en la base de datos (trabajadores, proveedores, clientes, etc.) mediante elementos sencillos.

Existe una diferencia fundamental entre el SI de una empresa como el presentado anteriormente y un S.I.G. Los elementos que deberán integrar un S.I.G incluyen variables que, como la temperatura, varían constantemente de un punto a otro del espacio y en muchas ocasiones se desconoce su valor preciso, por otro lado se manejan entidades que no tienen límites precisos, por ejemplo la Sierra de Carrasco y, finalmente habrá entidades con límites precisos pero variables con el tiempo.

Codificar toda la información relevante acerca de una porción del territorio en forma de estructura de datos es, por tanto, mucho más complejo que en el caso anterior. Supone un gran salto que se entiende mejor si consideramos la existencia de varios niveles de abstracción:

1. **Realidad perceptible** (montañas, lagos, campos de cultivo, etc.). Nivel propio de los gestores preocupados por problemas de gestión y planificación del espacio.

2. **Modelo conceptual.** Nivel de los científicos (geógrafos, geólogos, ecólogos, etc.) que desarrollan, verifican o aplican teorías e hipótesis sobre variables y procesos que tienen lugar en el espacio. Estos consideran la existencia de dos tipos fundamentales de elementos sobre la superficie terrestre: entidades y variables. Deben ser capaces de tomar un problema abstracto del nivel anterior y determinar las variables implicadas en su resolución.
3. **Modelo lógico.** Nivel de los técnicos en S.I.G que utilizan las herramientas del sistema para llevar a cabo, en el ordenador, las tareas requeridas por gestores o científicos. En lugar de trabajar con la realidad trabajan con representaciones de la misma que suelen ser de dos tipos: raster y vectorial. Deben decidir cual es la más adecuada para representar las variables obtenidas en el desarrollo del modelo conceptual y cuales son los procedimientos más adecuados para obtenerla con los datos de partida disponibles.
4. **Modelo digital o estructura de datos.** Nivel de informáticos, y desarrolladores de S.I.G cuya misión es optimizar las estructuras de datos utilizadas para almacenar la información y ampliar el repertorio de herramientas para cumplir en la medida de lo posible las necesidades de los científicos y técnicos en S.I.G.

Tal como aparece en la Figura 8. 2, cada uno de estos pasos está interrelacionado con los demás. La comunicación entre unos y otros se hace cada vez más difícil cuanto más alejados se encuentren en la anterior jerarquía, por tanto es necesaria la existencia de especialistas de los diferentes niveles para el adecuado desarrollo de un proyecto, al mismo tiempo se requiere un diálogo constante entre los mismos. No obstante suele darse el caso de personas que abarcan varios niveles de esta jerarquía, especialmente cuando la introducción de los S.I.G en una organización está dando sus primeros pasos.

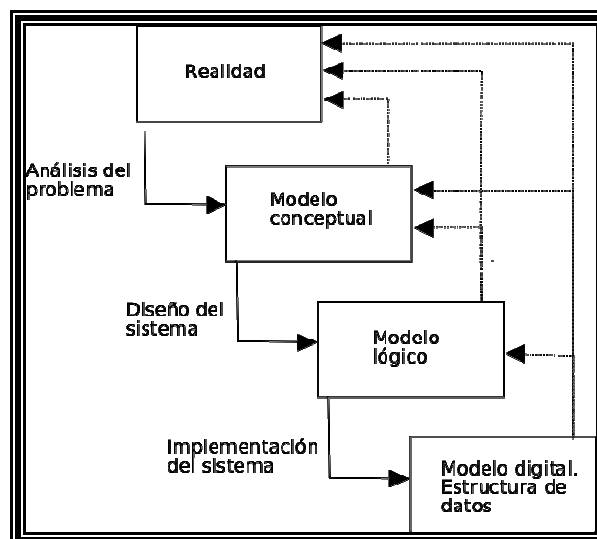


Figura 8. 2. Esquema de la modelización de datos en S.I.G.

8.1.1 EL MODELO CONCEPTUAL. ENTIDADES Y VARIABLES.

La realidad, por ejemplo el trozo de realidad representado en la (Figura 8. 3) puede entenderse según dos modelos mentales (conceptuales) en principio contradictorios:

1. Como un continuo definido por una serie de *variables* que pueden ser de tipo cualitativo (litología, usos del suelo, etc.) o bien tratarse de *superficies*⁵³ (elevaciones, precipitación, etc.) (Figura 8. 3 y Figura 8.4) De este modo una porción del territorio puede caracterizarse por la superposición de un conjunto de superficies que se consideran como más Significativas.
2. Como la yuxtaposición de *entidades* de límites definidos y con características homogéneas, por ejemplo parcelas de propiedad, núcleos urbanos, carreteras, etc. Cada uno de estos objetos va a tener un identificador único (Figura 8. 5 y Figura 8. 6)⁵⁴. Mientras que las variables cubren el espacio de forma completa, una capa formada por un conjunto de objetos puede no hacerlo.

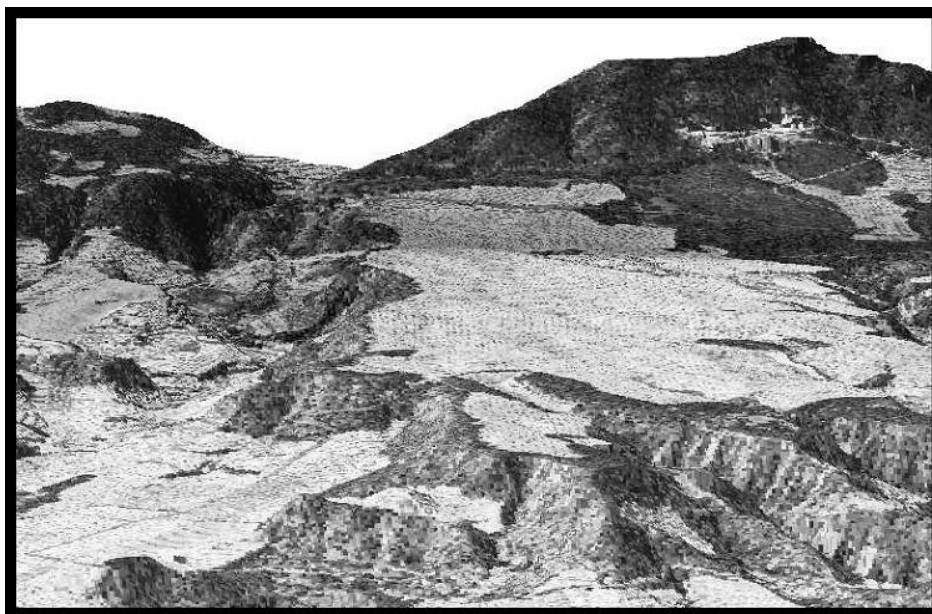


Figura 8. 3. Realidad

⁵³ Se trata de variables cuantitativas que varían de forma más o menos suave a través del espacio. A este tipo de variables espaciales se les denomina en algunos manuales de S.I.G como *campos* por analogía con el campo electromagnético que muestra propiedades similares, se ha utilizado también el término *variable regionalizada* que procede de la geoestadística, aquí se ha preferido el término *superficie*, también muy utilizado, para evitar confusiones cuando se hable de variables en un sentido más general).

⁵⁴ http://www.asifunciona.com/electronica/af_gps/af_gps_10.htm

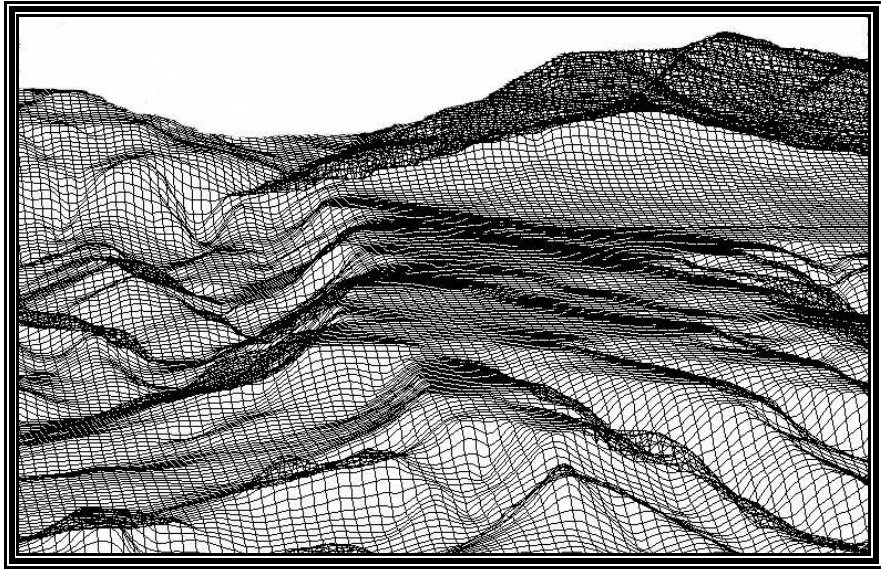


Figura 8. 4. Superficie.

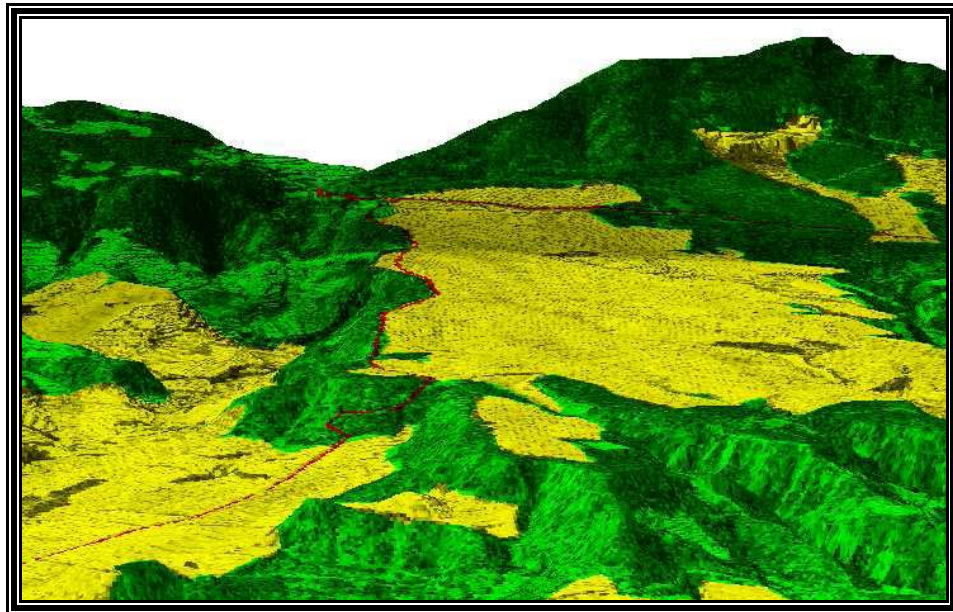


Figura 8. 5. Objetos

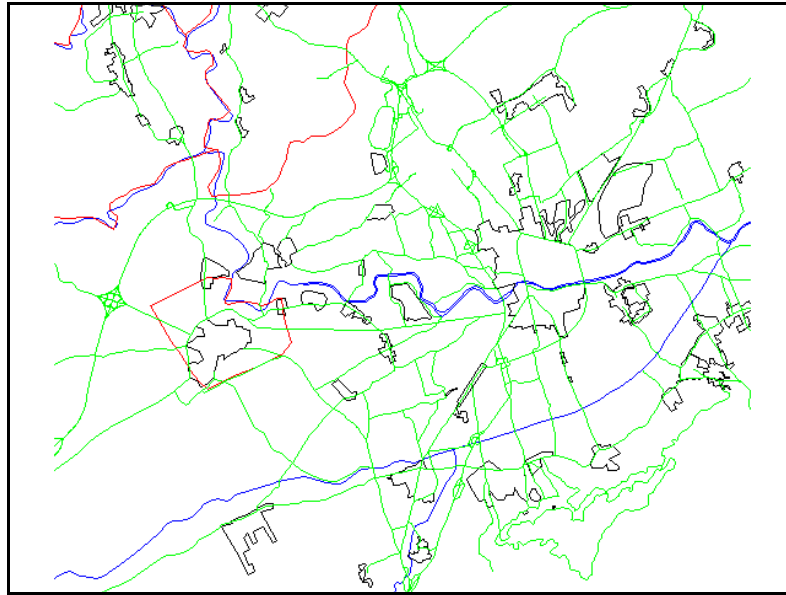


Figura 8. 6. Representación de objetos (carreteras, red de drenaje, núcleos urbanos y límites municipales) en un S.I.G.

8.1.2. SUPERFICIES.

En el primer caso podemos estudiar la realidad como un conjunto de superficies definidas por variables cuantitativas (altitud, humedad del suelo, precipitación, densidad de vegetación) que adquieren diferentes valores en diferentes puntos del espacio, siendo estos valores más parecidos cuanto más cerca se encuentren los puntos, a esta propiedad se denomina *auto correlación espacial*.(Figura 8. 4)⁵⁴

Las superficies son objetos tridimensionales con dos dimensiones que representan los ejes espaciales y una tercera que representa una tercera variable cuantitativa representada en cada punto del espacio.

Este tipo de modelos se suelen denominar como de dos dimensiones topológicas y media (gráficos 2,5D), pues en realidad la tercera dimensión (la Z) no se analiza en su totalidad, no se considera exactamente un hecho volumétrico, sino una superficie (las dos dimensiones) ondulada, levantada en tres dimensiones (la media dimensión).

⁵⁴ http://www.asifunciona.com/electronica/af_gps/af_gps_10.htm

Los gráficos y los análisis verdaderamente 3D necesitan emplear modelos de datos diferentes y bastante más complejos que son de especial utilidad para algunas aplicaciones prácticas como en Geología, Oceanografía o Meteorología.

Mientras que el resto de los objetos son más o menos perceptibles sobre el terreno o utilizando la cartografía apropiada, las superficies suelen ser mucho más difíciles de determinar, ya que en cada punto del territorio los valores son diferentes, al no disponer de un valor para cada punto, es necesario realizar una estimación. Es necesario recurrir a técnicas de interpolación.

El ejemplo más típico de superficie es la elevación sobre el nivel del mar, representada mediante los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE). Se trata de una superficie que representa la topografía del terreno, es decir, las alturas en cada punto de un territorio. Pero, en realidad, se puede crear superficies a partir de cualquier variable que cumpla unas mínimas características, esencialmente la continuidad espacial, sin que existan saltos bruscos en el valor de la variable. De este modo, diversos aspectos físicos naturales, tales como las precipitaciones, las temperaturas, la composición litológica o mineral, la acidez o basicidad de los suelos, etc., o también variables sociales: número de habitantes, densidad de población, etc., se pueden representar y analizar como una superficie.

8.1.3. ENTIDADES.

Si consideramos la realidad como una yuxtaposición de objetos, cualquier entidad que aparezca en el espacio (casas, carreteras, lagos, tipos de roca, etc.) puede modelizarse a la escala adecuada como un objeto extraído de la geometría euclidiana. Pueden ser clasificados en función del número de dimensiones en tres tipos:

🌐 **Objetos puntuales** (Figura 8. 7a)⁵⁴. Objetos geométricos de dimensión cero, su localización espacial se representa por un par de coordenadas (X, Y).
Objetos lineales (Figura 8. 7b). Objetos geométricos de dimensión uno, su localización espacial se representa como una sucesión de pares de coordenadas llamados vértices, salvo el primero y el último que se denominan nodos.

(En la Figura 8. 7b aparecen los vértices en blanco y los nodos en negro).

🌐 **Objetos poligonales.** Objetos geométricos de dimensión dos. Se representan como una línea (Figura 8. 7c) o como una sucesión de líneas denominadas arcos (Figura 8. 7d).

⁵⁴ http://www.asifunciona.com/electronica/af_gps/af_gps_10.htm

El escoger un tipo u otro para representar determinado objeto dependerá en gran manera de la escala y del tipo de abstracción que se pretenda hacer, de forma similar a lo que ocurre en la generalización cartográfica.

Así una ciudad puede ser puntual o poligonal y un cauce fluvial lineal o poligonal. Una ciudad sólo tendrá sentido considerarla poligonal en estudios de planificación urbana. Para casi todas las aplicaciones hidrológicas tiene más sentido representar los cauces como objetos lineales y codificar su anchura y profundidad como propiedades espaciales.

Podemos considerar a priori, categorías de información que caracterizan a las diferentes entidades que aparecen en el espacio:

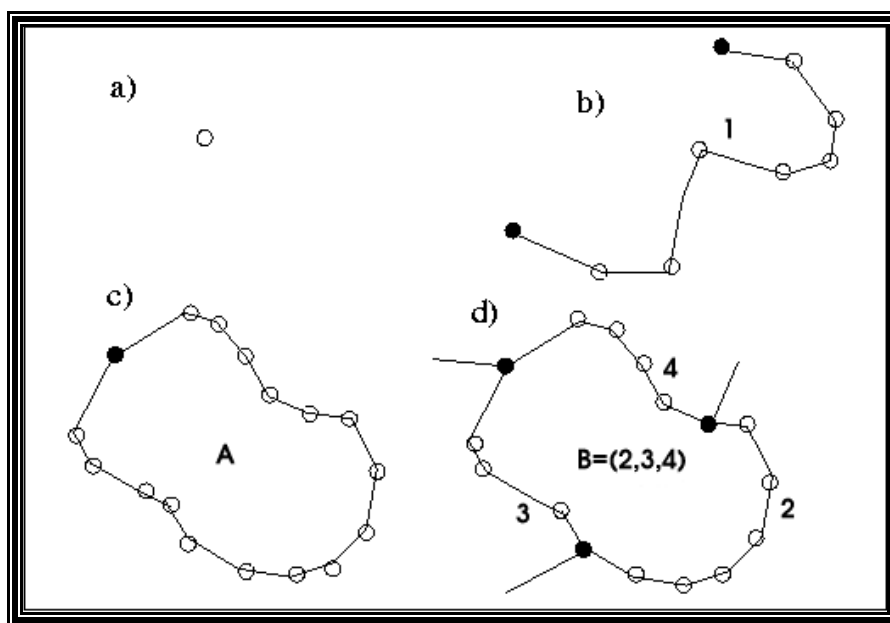


Figura 8. 7. Tipos de objetos en formato vectorial a) Punto, b) Línea, c) Polígono en formato nodo, d) Polígono en formato Arco-Nodo

1. **Identificador.** Se trata de una variable cuantitativa que identifica cada objeto dentro de un conjunto de objetos del mismo tipo. Cada entidad recibe por tanto un identificador único.

2. **Posición.** Indica la ubicación del objeto en un espacio, generalmente bidimensional. Implícitamente indica también su dimensión y su forma. De este modo cada tipo de objeto tiene, en función de su número de dimensiones, una serie de propiedades espaciales de tamaño y forma directamente extraíbles de su codificación espacial:

⊕ Los objetos lineales tienen longitud, sinuosidad y orientación.

⊕ Los objetos poligonales tienen área, perímetro, elongación máxima y diversos índices de forma directamente calculables a partir de estas.

3. **Propiedades espaciales.** Son variables cuantitativas medidas en magnitudes espaciales y que indican algún aspecto de la extensión espacial de los objetos no representable debido a la escala de trabajo, a tratarse de una magnitud en la tercera dimensión o a la dificultad de representarla por el tipo de abstracción que implica su representación (por ejemplo la profundidad de un cauce o la anchura de una carretera).

4. **Propiedades no espaciales.** Son variables cualitativas o cuantitativas que no tienen nada que ver con el espacio pero que se relacionan con el objeto. Resultan de mediciones simples o de descripciones. Pueden ser constantes o variables en el tiempo. Por ejemplo toda la información relativa a la demografía de un municipio. Existen diversas operaciones que permiten derivar propiedades nuevas a partir de otras ya existentes.

⊕ Combinación aritmética: Densidad = Población/Superficie

⊕ Combinación lógica: Si Población < x & PIB > y => Riqueza = 1

⊕ Reclasificación: Si Población < 1000 & Población > 500 => Recl = 2

5. **Relaciones con el entorno.** Todos los objetos geográficos tienen unas relaciones con su entorno, es decir con el resto de los objetos del mismo o distinto tipo que aparecen a su alrededor. Estas relaciones pueden ser de tipo puramente topológico (polígonos vecinos) o de tipo físico (cauces tributarios que se conectan al cauce principal). Pueden codificarse de forma explícita en la base de datos asociada al objeto o estar implícita en la codificación de su localización espacial. Estas relaciones pueden dar lugar a la creación de tipos compuestos (redes, mapas de polígonos, etc.).

8.2. MODELOS LÓGICOS. FORMATO RASTER Y VECTORIAL.

El modelo lógico hace referencia a como se muestrean y organizan las variables y objetos para lograr una representación lo más adecuada posible.

En un S.I.G existen básicamente dos modelos lógicos que se conocen como formato raster y formato vectorial y que dan lugar a los dos grandes tipos de capas de información espacial.

- 🌐 En el **formato raster** se divide el espacio en un conjunto regular de celdillas, cada una de estas celdillas contiene un número que puede ser el identificador de un objeto (si se trata de una capa que contiene objetos) o del valor de una variable (si la capa contiene esta variable).
- 🌐 En el **formato vectorial** los diferentes objetos se representan como puntos, líneas o polígonos (Figura 8. 7). La representación de puntos o líneas es inmediata, sin embargo al representar polígonos aparecen dos situaciones diferentes (Figura 8. 6):
 - ⊕ Si los polígonos aparecen aislados los unos de los otros, como en el caso de los núcleos urbanos, cada polígono se codifica como una línea cerrada, se trata de un modelo *Orientado al Objeto*, tal como aparece en la en el que el polígono A se codifica como una única línea. Si los polígonos se yuxtaponen, como en el caso de los términos municipales, codificar los polígonos como líneas cerradas tiene el problema de que habría que repetir cada una de las líneas interiores; por ejemplo el límite entre una población y otra se representan en la Figura 8. 7. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** debería introducirse dos veces, una al codificar la población 1 y otra al codificar la población 2.
 - ⊕ El formato alternativo es el modelo *Arco-Nodo* con el que se codifican las líneas por separado y, posteriormente, se define cada uno de los polígonos a partir del conjunto de líneas que lo componen. Así en la Figura 8. 7d del polígono B se codifica como la unión de los arcos 2, 3 y 4. La codificación de polígonos

Con este modelo requiere por tanto dos etapas:

1. **Digitalización**, durante la que se introducen los arcos
2. **Reconstrucción de la topología**, durante el que se definen los polígonos y se crea la tabla que relaciona polígonos con arcos. La reconstrucción de la topología exige que la disposición de los arcos sea topológicamente correcta, así en la Figura 8. 6. De los nodos iniciales y finales de los tres arcos deben coincidir exactamente.

La mayor virtud del modelo *Arco-Nodo* es ahorrar memoria, facilitar la digitalización y algunas de las operaciones de análisis S.I.G, siendo hoy día el modelo más utilizado.

8.2.1. REPRESENTACIÓN DE SUPERFICIES, VARIABLES CUALITATIVAS Y ENTIDADES.

Generalmente se considera que el formato vectorial es más adecuado para la representación de entidades o variables cualitativas y el formato raster para representar superficies. Sin embargo esto no es necesariamente así.

Para representar superficies podemos considerar hasta 4 modelos posibles (Figura 8. 10).

- ☉ Malla regular de puntos, a cada uno de ellos se asigna el valor de la variable medido en el punto.
- ☉ TIN (Red Irregular de Triángulos), los puntos se concentran en aquellas zonas donde la variable representada tiene mayor variabilidad (Figura 8. 8)⁵⁵.

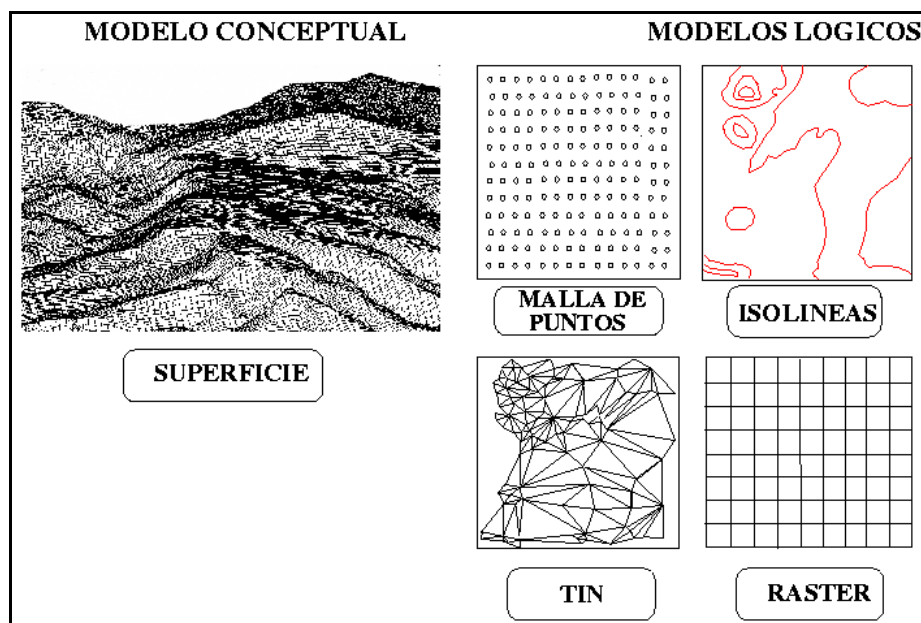


Figura 8. 8. Modelos lógicos para representar superficies.

- ☉ Isolíneas (líneas en las que el identificador se sustituye por el valor de la variable).
- ☉ Raster, el área de trabajo se divide en celdillas.

⁵⁵ <http://www.hyparion.com/>

Los tres primeros son representaciones en formato vectorial ya que se utilizan puntos o líneas para representar variables regionalizadas. El problema fundamental que plantean es que no representan a la totalidad del espacio, por tanto requieren una interpolación más o menos compleja para saber cual es el valor en un punto concreto.

El modelo raster completa el espacio y la obtención del valor en cualquier punto es inmediata. Para representar variables cualitativas existen dos alternativas (Figura 8. 9)⁵⁵.

- ☉ Formato raster
- ☉ Formato vectorial Arco-Nodo
- ☉ Formato vectorial orientado a objetos, menos adecuado debido a que se introduce mucha información redundante.

Para representar objetos las alternativas son (Figura 8. 10)⁵⁵

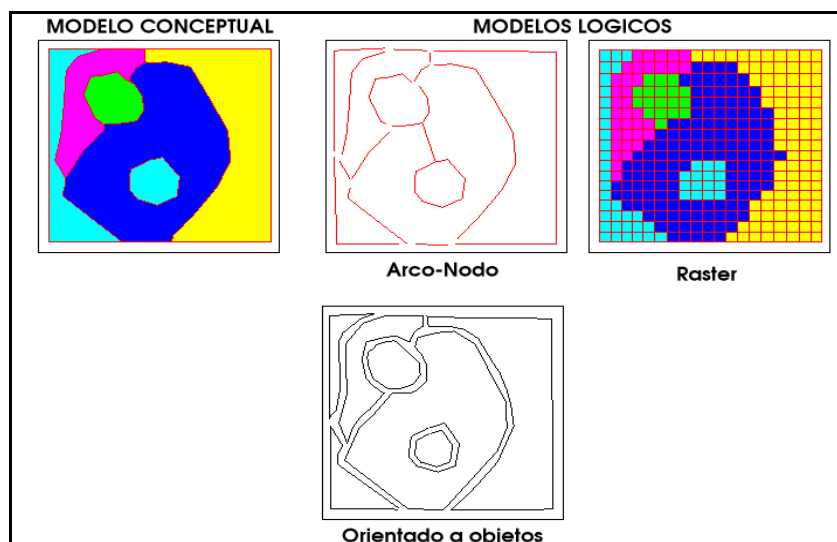


Figura 8. 9. Modelos lógicos para representar variables cualitativas.

- ☉ Formato vectorial Arco-nodo u orientado a objetos, si los polígonos no se tocan es lo mismo.
- ☉ Formato raster, en una misma capa no pueden aparecer objetos que coinciden en el espacio.

⁵⁵ <http://www.hyparion.com/>

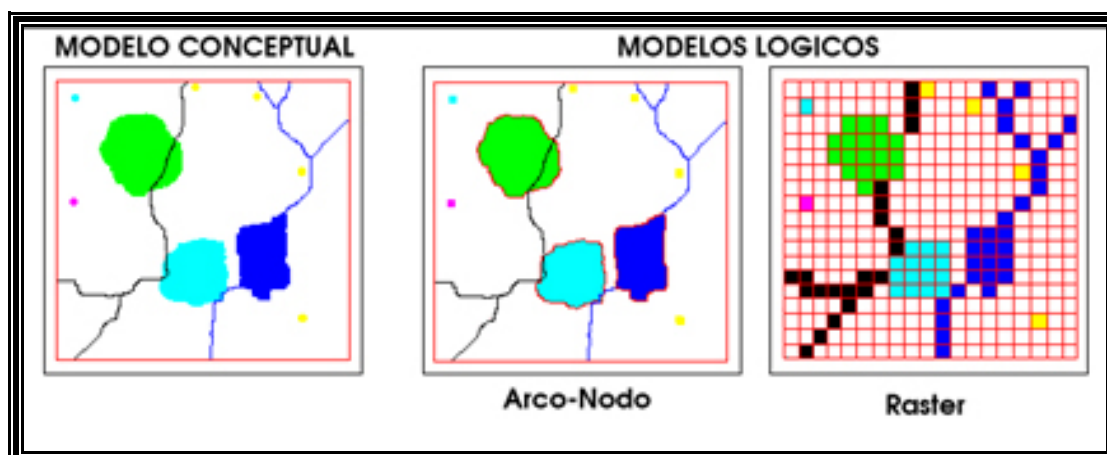


Figura 8. 10. Modelos lógicos para representar entidades.

En el caso de variables cualitativas y objetos, el formato raster define de forma explícita el interior y de forma implícita el exterior, en el caso del formato vectorial es al revés.

8.2.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FORMATOS RASTER Y VECTORIAL.

El debate acerca de la conveniencia de uno u otro modelo ha dado lugar a una abundante bibliografía, la decisión entre un modelo u otro debe, en todo caso, basarse en el tipo de estudio o enfoque que se quiera hacer, pero también del software y fuentes de datos disponibles.

Está claro que las superficies se representan más eficientemente en formato raster y sólo pueden representarse en formato vectorial mediante los modelos híbridos (mallas de puntos, TIN e isolineas) que no resultan adecuados para la realización de posteriores análisis ya que todas las operaciones que permite el modelo raster resultaran mucho más lentas con el modelo vectorial. En general, cualquier tipo de modelización física de procesos naturales que se base en Sistemas de Información Geográfica requiere una modelo de datos de tipo raster.

Tradicionalmente se ha considerado que para la representación de los objetos resulta más eficiente la utilización.

De un formato vectorial ya que ocupa menos espacio en disco duro (aunque este último problema puede compensarse mediante diversos sistemas de compresión y en todo caso es cada vez menos relevante debido a la cada vez mayor capacidad de los discos duros) y los ficheros se manejan de forma más rápida si lo que se quiere es simplemente visualizar la capa. Sin embargo el formato vectorial es más lento que el raster para la utilización de herramientas de análisis espacial y consultas acerca de posiciones geográficas concretas.

En el caso de las variables cualitativas estaríamos en un caso intermedio entre los dos anteriores. Las ventajas del modelo raster incluyen la simplicidad, la velocidad en la ejecución de los operadores y que es el modelo de datos que utilizan las imágenes de satélite o los modelos digitales de terreno. Entre las desventajas del modelo raster destaca su inexactitud que depende de la resolución de los datos y la gran cantidad de espacio que requiere para el almacenamiento de los datos.

Este último problema puede compensarse mediante diversos sistemas de compresión. Además en muchos casos se confunde precisión y exactitud cuando se trabaja con datos vectoriales de modo que la exactitud en las coordenadas del modelo vectorial es más teórica que real.

Hoy en día se tiende a compaginar ambos modelos facilitados por el aumento en la capacidad de los ordenadores.

Se trata de representar los diferentes fenómenos espaciales con el modelo de datos más apropiado en cada caso. En líneas generales se pueden codificar las formas en un modelo vectorial y los procesos con un modelo raster, para ello se requieren herramientas eficaces de paso de un formato al otro. Resulta sencillo, finalmente, la visualización simultánea de datos en los dos formatos gracias a la capacidad gráfica actual.

Cada uno de los modelos lógicos puede implementarse de diferentes formas dando lugar a diferentes *modelos digitales* (formatos de ficheros) diferentes y por tanto incompatibles entre diferentes programas.

Los formatos de ficheros pueden ser públicos (con lo cual resulta más sencillo desarrollar herramientas de importación exportación) o privados (con lo que para implementar estas herramientas habría que pagar derechos).

8.2.3. ESCALA Y MODELOS LÓGICOS DE DATOS.

El concepto tradicional de escala en cuanto relación entre dos longitudes, no tiene sentido en un S.I.G.

Las herramientas de zoom, disponibles en cualquier programa gráfico, permiten un cambio en la escala de representación en la pantalla o en una salida impresa, sin embargo este cambio de escala de representación no implica un cambio en la escala original de los datos.

En general se asume que la escala de un S.I.G es la de los mapas que se han utilizado como información de entrada (en realidad la del mapa con escala inferior

si se han utilizado varias). Sin embargo no toda la información de entrada procede de mapas (conjuntos de puntos de muestreo, imágenes de satélite, etc.). En el caso de los mapas de puntos la resolución se relaciona, aunque de manera algo difusa, con la distancia media entre los puntos.

En S.I.G sustituye el concepto de escala por otro concepto, algo difuso, que es el de precisión espacial de los datos. En el caso del formato raster la precisión se relaciona claramente con el tamaño de las celdillas.

Si hacemos un zoom excesivo aparecerán los bordes de estas como advertencia de que la profundidad del zoom es excesiva, en el caso del formato vectorial no tenemos este mecanismo de advertencia y en muchos casos se fuerzan los zoom para obtener una precisión completamente ilusoria.

8.3. EXACTITUD, PRECISIÓN Y ERROR.

En cualquier actividad científica o técnica es inevitable la existencia de errores. Puede tratarse de errores de medición o errores de transcripción, errores de posicionamiento o errores en la variable medida.

Tan absurdo resultaría negar el error como invertir esfuerzos más allá de lo razonable para conseguir pequeñas reducciones del mismo una vez que se ha conseguido una exactitud adecuada para los objetivos del trabajo.

La actitud más razonable es tratar de estimar la magnitud de los errores cometidos, comunicarlo y tenerlo en cuenta para no pedirle a los resultados una precisión mayor de la que realmente pueden ofrecer.

En primer lugar hay que distinguir entre *precisión* y *exactitud*. Precisión es el detalle con el que un instrumento o procedimiento puede medir una variable mientras que exactitud es lo que se acerca esta medición al valor real, en S.I.G. el concepto de precisión se relaciona con el de resolución en formato raster.

El *error* es la diferencia entre el valor real y el medido, sin embargo puesto que el valor real nunca se conoce realmente, el error siempre debe estimarse.

Por ejemplo, una regla tiene una precisión de milímetro mientras que un metro de electricista tiene una precisión de centímetro.

Sin embargo será más exacto medir un muro con un metro que con una regla ya que el instrumento es más apropiado.

En ocasiones los errores proceden de la utilización de ordenadores con precisión finita para manejar el espacio que es un continuo.

Los errores en las operaciones en coma flotante de los ordenadores pueden

afectar a los resultados, por ello es recomendable utilizar siempre números enteros. Por ejemplo, las coordenadas X e Y deberían expresarse siempre en metros nunca en kilómetros, los valores de las variables regionalizadas deberían expresarse de forma que no incluyeran decimales (altitud en centímetros, precipitación en décimas de milímetro, etc.).

De esta manera además de prevenir errores conseguiríamos que los ficheros ocuparan menos en el disco duro.

8.4. EL FORMATO RASTER. FUNDAMENTOS.

El formato raster se fundamenta en la división del área de estudio en una matriz de celdillas, generalmente cuadradas.

Cada una de estas celdillas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la misma. Este formato, por tanto, cubre la totalidad del espacio, este hecho supone una ventaja fundamental ya que pueden obtenerse valores de forma inmediata para cualquier punto del mismo.

8.4.1. ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA CAPA RASTER.

Una capa en formato raster está compuesta por cuatro elementos fundamentales:

- 🌐 La *matriz de datos*, que puede contener tres tipos de datos:
 - ⊕ Valores numéricos en caso de que la variable representada sea cuantitativa (Figura 8. 11)
 - ⊕ Identificadores numéricos en caso de que se trate de una variable cualitativa. Estos identificadores se corresponden con etiquetas de texto que describen los diferentes valores de la variable cualitativa (Figura 8. 12)
 - ⊕ Identificadores numéricos únicos para cada una de las entidades representadas en caso de que la capa raster contenga entidades (puntos, líneas o polígonos).

Aunque el formato raster responde fundamentalmente a una concepción del mundo Real como conjunto de variables puede utilizarse también para representar entidades. Si suponemos un fondo en el que no exista nada (valor NULL en todas las celdillas) podemos representar objetos puntuales mediante celdillas aisladas con un valor (diferente de cero) que actuará normalmente como identificador; las líneas estarían constituidas por ristas de celdillas adyacentes con valores

diferentes de cero los polígonos por conjuntos de polígonos con un mismo valor diferente de cero. (Figura 8. 10)

Por tanto es necesario introducir el concepto de valor nulo (NULL⁵⁶), que es el que tienen las celdillas en las que no aparece ninguna entidad.

Si el conjunto de polígonos cierra el espacio, el resultado es similar a representar una variable espacial cualitativa, la diferencia estriba en que en un mapa de polígonos, cada uno de ellos tiene su propio identificador. Por ejemplo, en un mapa de usos de suelo considerado como variable cualitativa, todos los campos de secano tendrán el mismo valor, pero en un mapa de polígonos representado en formato raster cada polígono tiene su propio identificador, posteriormente a cada identificador se asigna su uso de suelo.

La matriz de datos se almacena en un fichero como una lista de valores numéricos, pero una capa raster necesita además información que permita al programa y al usuario ubicar en el espacio estos valores y entender su Significado. Concretamente se necesita:

Información geométrica acerca de la matriz y de su posición en el espacio:

- ✓ Número de columnas (***nc***)
- ✓ Número de filas (***nf***)
- ✓ Coordenadas de las esquinas de la capa (***e, w, s, n***)
- ✓ Resolución o tamaño de pixel en latitud (***rx***) y en longitud (***ry***)
- ⊕ Una tabla de colores que permita decidir de qué color se pintará cada celdilla en la pantalla
- ⊕ En caso de que la variable sea cualitativa, una tabla que haga corresponder a cada identificador numérico una etiqueta de texto descriptiva.

Hay una serie de convenciones acerca de la forma de representación. Así la primera columna en una capa raster, la columna número cero, es la de la izquierda (oeste) aumentando el número de columna hacia la derecha (este), mientras que la primera fila, la número cero, será la superior (norte) aumentando hacia abajo (sur), en sentido contrario al que Siguen las coordenadas geográficas y las representaciones en un modelo vectorial. Puesto que la primera fila es la número 0, estas se numeran desde 0 hasta ***nf - 1***, y lo mismo para las columnas.

⁵⁶ En algunos sistemas que no contemplan el valor *NULL*, se utiliza el cero, aunque evidentemente que una variable tenga valor cero es muy distinto a que no tenga valor

Todo ello da lugar a una serie de relaciones entre las variables que definen la situación espacial de las celdillas y que van a utilizarse a la hora de visualizar la capa raster en pantalla y de realizar consultas sobre ellas.

- ④ El número de celdas es $nc - nf$. Normalmente rx y ry son constantes y van a tener el mismo valor. En algunos casos no es así, por ejemplo
- ④ En el caso de imágenes de satélite de baja resolución que se ven afectadas por la curvatura de la Tierra.
- ④ Las ecuaciones para obtener las coordenadas del centro de cada celda partiendo de su número de columna y de fila son:

$$X = w + (c + 0,5) \cdot rx \quad (7.1)$$

$$Y = s + (nf - f + 0,5) \cdot ry \quad (7.2)$$

A la inversa pueden obtenerse el número de columna y de fila a partir de los valores de X e Y:

$$c = \frac{\text{int}(X - w)}{rx} \quad (7.3)$$

$$f = nf - \left(\frac{\text{int}(Y - s)}{ry} \right) \quad (7.4)$$

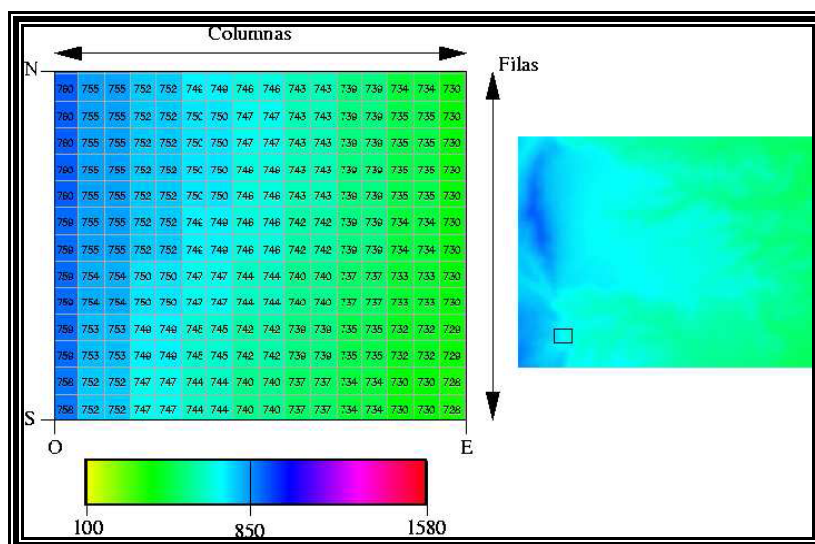


Figura 8. 11. Modelos digitales. Codificación de una variable cuantitativa en formato raster.

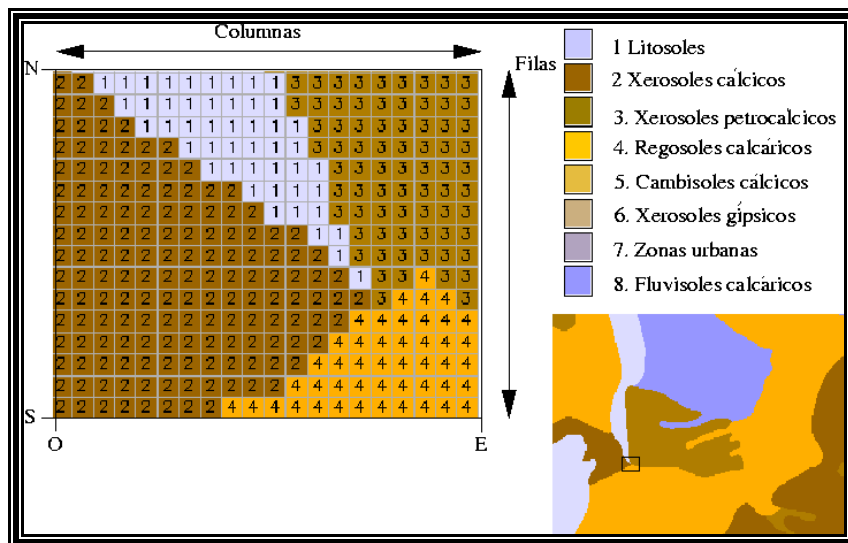


Figura 8. 12. Modelos digitales. Codificación de una variable cualitativa en formato raster.

Estas dos últimas ecuaciones asumen además la convención de que la primera fila y la primera columna son la fila 0 y la columna 0.

Sabiendo el número de fila y columna de una celdilla es también sencillo obtener el número de orden del pixel:

$$N = n_c * f + c \quad 7.5$$

De manera que la primera celdilla es la celdilla número cero y la última la $n_c(n_f) - 1$.

Ejemplos

En las (Figura 8. 11 y Figura 8. 12)⁵⁷ aparecen dos ejemplos de capa raster. Asumiendo que la esquina inferior izquierda de las áreas en detalle coinciden con el punto de coordenadas X=632000 Y=4200000 y que en ambos casos el tamaño de la celdilla es de

$$r_x = r_y = 25 \text{ metros, calcula:}$$

1. Los valores de n, s, e y w para cada una de las áreas en detalle Solución:
En ambos casos s = 4200000 y w = 632000 ya que la esquina inferior izquierda coincide con el límite SW

En la Figura 8. 11: $n_f = 13, n_c = 16,$

⁵⁷ http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_field_guide/B_proyecciones_cartograficas.pdf

Por tanto $n = s + n_f n_{ry} = 4200325$ y $e = w + n_c r_x = 632400$

En la Figura 8. 12 : $n_f = 16, n_c = 20,$

Por tanto $n = s + n_f n_{ry} = 4200400$ y $e = w + n_c r_x = 632500$

2. La altitud y el tipo de suelo del punto de coordenadas X=632120 Y=4200080 Solución:
En primer lugar hay que calcular el número de fila y de columna.

Para la Figura 8. 11

$$f = n - \text{int}(Y - s)/r_y = 10$$

$$c = \text{int}\left(\frac{X - w}{r_x}\right) = 4$$

Para la Figura 8. 12

$$f = n - \text{int}(Y - s)/r_y = 13$$

$$c = \text{int}\left(\frac{X - w}{r_x}\right) = 4$$

Posteriormente basta con buscar en las matrices de datos representadas en Figura 8. 11 y Figura 8. 12 recordando que la primera fila y la primera columna son cero.

Por tanto altitud=749, suelo=Xerosoles cálcicos.

8.4.2. VISUALIZACIÓN Y CONSULTA DE CAPAS RASTER.

La pantalla de una PC guarda una evidente semejanza con un capa raster. Se trata de un espacio rectangular dividido en pixeles que pueden adoptar diversos colores. Por tanto, a la hora de mostrar una capa raster en la pantalla de la computadora, el programa deberá establecer una correspondencia entre los límites de la porción de la capa raster visualizada en cada momentos y el número de filas y columnas disponibles en la ventana que va a mostrar la información. De manera que en ocasiones no se pintarán todas las celdillas sino sólo una de cada dos, una de cada tres, etc.; en otros casos una misma celdilla necesitará varios pixeles para pintarse.

Las herramientas de zoom y desplazamiento que tienen todos los programas de S.I.G. requieren un continuo recálculo de estas relaciones ya que la región visualizada varía constantemente.

Algo similar ocurre con las herramientas de consulta interactiva. Para utilizarlas, el usuario debe pinchar en un punto de la pantalla que muestra la capa raster; puesto que el programa conoce la relación entre filas y columnas de la ventana gráfica y las filas y columnas de la región visualizada, se podrá hacer una conversión rápida de unas a otras unidades y a partir de hay obtener la posición en memoria del valor consultado utilizando la ecuación **7.5**

Por lo que se refiere a la visualización, el usuario puede seleccionar que celdillas quiere ver y cuales no en función de los valores de dichas celdillas en una o más capas raster. Para ello debe definir una **máscara**. Una máscara en una capa raster de variable binomial que contiene sólo unos y NULL, de manera que sólo se representarán aquellas celdillas que tengan un valor 1 en la máscara. Una máscara puede definirse por procedimientos de álgebra de mapas

8.4.3. ASCII Y BINARIO.

Toda la información que se almacena en un ordenador puede encontrarse en formato ASCII o binario, que son los dos formatos básicos de codificación de información en un ordenador. La forma natural, desde el punto de vista de la máquina, es almacenar la información en formato binario; y la forma natural para el usuario es hacerlo en formato ASCII. Ambos sistemas utilizan el byte como unidad mínima de información capaz de almacenar 256 valores diferentes (normalmente números entre 0 y 255).

El formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange) se basa en un sistema de codificación que asigna a cada carácter alfanumérico (A-Z, a-z, 0-9) o de control (retorno de carro, paso de línea, etc.) un valor entre 0 y 255. De este modo al almacenar un texto se utiliza un byte por carácter más algunos bytes de control, el problema surge a la hora de almacenar números.

Cuando almacenamos un número en ASCII lo que se hace es utilizar un byte para almacenar cada una de los dígitos que lo componen (incluyendo un byte para el punto en los decimales) más algún carácter de separación entre números (espacio, coma, retorno de carro). En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Aparece el carácter que corresponden de a cada uno de los 256 valores.

Por ejemplo el número **274.96** utilizaría 6 bytes [50] [55] [52] [46] [57] [54] y la palabra **S.I.G.** 3 bytes [83] [73] [71]. La codificación ASCII tiene la ventaja fundamental de que puede leerse con cualquier editor o procesador de textos o con la orden type de MS-DOS o cat de Unix. Proporciona a los usuarios menos avanzados una sensación de seguridad, que en algunos casos está fundamentada. Sin embargo tiene tres desventajas fundamentales:

Los ficheros ASCII que contienen números son mucho más largos (de dos a cuatro veces mayores) lo que es especialmente relevante para el tipo de ficheros (muy grandes) que suelen manejarse en un S.I.G.

Dec	Hx	Oct	Char	Dec	Hx	Oct	Char	Dec	Hx	Oct	Char	Dec	Hx	Oct	Char
0	0	000	NUL (null)	32	20	040	SPACE	64	40	100	@	96	60	140	`
1	1	001	SOH (start of heading)	33	21	041	!	65	41	101	A	97	61	141	a
2	2	002	STX (start of text)	34	22	042	"	66	42	102	B	98	62	142	b
3	3	003	ETX (end of text)	35	23	043	#	67	43	103	C	99	63	143	c
4	4	004	EOT (end of transmission)	36	24	044	\$	68	44	104	D	100	64	144	d
5	5	005	ENQ (enquiry)	37	25	045	%	69	45	105	E	101	65	145	e
6	6	006	ACK (acknowledge)	38	26	046	&	70	46	106	F	102	66	146	f
7	7	007	BEL (bell)	39	27	047	'	71	47	107	G	103	67	147	g
8	8	010	BS (backspace)	40	28	050	(	72	48	110	H	104	68	150	h
9	9	011	TAB (horizontal tab)	41	29	051	)	73	49	111	I	105	69	151	i
10	A	012	LF (NL line feed, new line)	42	2A	052	*	74	4A	112	J	106	6A	152	j
11	B	013	VT (vertical tab)	43	2B	053	+	75	4B	113	K	107	6B	153	k
12	C	014	FF (NP form feed, new page)	44	2C	054	,	76	4C	114	L	108	6C	154	l
13	D	015	CR (carriage return)	45	2D	055	-	77	4D	115	M	109	6D	155	m
14	E	016	SO (shift out)	46	2E	056	.	78	4E	116	N	110	6E	156	n
15	F	017	SI (shift in)	47	2F	057	/	79	4F	117	O	111	6F	157	o
16	10	020	DLE (data link escape)	48	30	060	0	80	50	120	P	112	70	160	p
17	11	021	DC1 (device control 1)	49	31	061	1	81	51	121	Q	113	71	161	q
18	12	022	DC2 (device control 2)	50	32	062	2	82	52	122	R	114	72	162	r
19	13	023	DC3 (device control 3)	51	33	063	3	83	53	123	S	115	73	163	s
20	14	024	DC4 (device control 4)	52	34	064	4	84	54	124	T	116	74	164	t
21	15	025	NAK (negative acknowledge)	53	35	065	5	85	55	125	U	117	75	165	u
22	16	026	SYN (synchronous idle)	54	36	066	6	86	56	126	V	118	76	166	v
23	17	027	ETB (end of trans. block)	55	37	067	7	87	57	127	W	119	77	167	w
24	18	030	CAN (cancel)	56	38	070	8	88	58	130	X	120	78	170	x
25	19	031	EM (end of medium)	57	39	071	9	89	59	131	Y	121	79	171	y
26	1A	032	SUB (substitute)	58	3A	072	:	90	5A	132	Z	122	7A	172	z
27	1B	033	ESC (escape)	59	3B	073	;	91	5B	133	[	123	7B	173	{
28	1C	034	FS (file separator)	60	3C	074	<	92	5C	134	\	124	7C	174	|
29	1D	035	GS (group separator)	61	3D	075	=	93	5D	135	]	125	7D	175	}
30	1E	036	RS (record separator)	62	3E	076	>	94	5E	136	^	126	7E	176	~
31	1F	037	US (unit separator)	63	3F	077	?	95	5F	137	_	127	7F	177	DEL

128	Ç	144	É	160	á	176	☼	193	⊥	209	⌘	225	ß	241	±
129	ü	145	æ	161	í	177	☼	194	⊥	210	⌘	226	Γ	242	≥
130	é	146	Æ	162	ó	178	☼	195	⊥	211	⌘	227	π	243	≤
131	â	147	ô	163	ú	179	|	196	-	212	⌘	228	Σ	244	∫
132	ä	148	ö	164	ñ	180	†	197	+	213	⌘	229	σ	245	∫
133	à	149	ò	165	Ñ	181	‡	198	‡	214	⌘	230	μ	246	+
134	â	150	û	166	ª	182	‡	199	‡	215	⌘	231	τ	247	≈
135	ç	151	ù	167	º	183	⌘	200	⌘	216	‡	232	Φ	248	°
136	ê	152	_	168	¿	184	⌘	201	⌘	217	‡	233	⊙	249	.
137	ë	153	Ö	169	_	185	‡	202	⌘	218	⌘	234	Ω	250	.
138	è	154	Û	170	¬	186	‡	203	⌘	219	■	235	δ	251	√
139	ï	156	£	171	½	187	⌘	204	‡	220	■	236	∞	252	_
140	î	157	¥	172	¼	188	‡	205	=	221	■	237	φ	253	²
141	ï	158	_	173	¡	189	‡	206	‡	222	■	238	ε	254	■
142	Ä	159	f	174	«	190	‡	207	±	223	■	239	∧	255	
143	Å	192	L	175	»	191	‡	208	⌘	224	α	240	≡		

Figura 8. 13. Código ASCII

Es mucho más lento, primero por ser más largo y segundo porque el ordenador debe transformar la cadena de dígitos que ha leído en un número.

En el modelo raster, el formato binario permite acceso directo a los datos ya que, puesto que todos los datos de un fichero tienen el mismo tamaño en bytes, podemos saber en que punto del fichero se encuentra un determinado dato con sólo conocer su fila y columna. El formato ASCII solo permite acceso secuencial, uno por uno, ya que no todos los datos tienen el mismo tamaño en bytes y hay que buscarlo en el fichero.

En el formato binario se establece en primer lugar el número de bytes que van a hacer falta para almacenar una variable. Esto incluye saber cual será el valor mínimo, máximo y la precisión de los decimales en caso de valores no enteros. Si en un byte pueden almacenarse 256 valores distintos, el número de valores que pueden almacenarse en n bytes se obtiene como 256^n . De este modo en el formato raster, todas las celdillas ocuparán el mismo número de bytes.

8.5 FORMATO VECTORIAL. ANÁLISIS ESPACIAL

Al contrario de lo que ocurre con el formato raster, el formato vectorial define objetos geométricos (puntos, líneas y polígonos) mediante la codificación explícita de sus coordenadas. Los puntos se codifican en formato vectorial por un par de coordenadas en el espacio, las líneas como una sucesión de puntos conectados y los polígonos como líneas cerradas (formato orientado a objetos) o como un conjunto de líneas que constituyen las diferentes fronteras del polígono (formato Arco/nodo).

Este formato resulta especialmente adecuado para la representación de entidades reales ubicadas en el espacio (carreteras, ríos, parcelas de cultivo). También resulta más adecuado que el raster cuando se manejan datos que suponen un valor promediado sobre una extensión de territorio que se considera homogénea, los límites de la misma pueden ser arbitrarios o no (por ejemplo estadísticas municipales, datos piezométricos en acuíferos, etc.).

Mientras que la estructura raster codifica de forma explícita el interior de los objetos e implícitamente el exterior, el formato vectorial codifica explícitamente la frontera de los polígonos e implícitamente el interior, aunque en ambos casos lo realmente importante es el interior. Esto Significa que resulta fácil saber lo que hay en cada punto del territorio en un formato raster pero no en un formato vectorial, por tanto los algoritmos utilizados para las operaciones de álgebra de mapas son completamente diferentes. En general las operaciones son más difíciles y exigen mayor tiempo de computación para el formato vectorial.

Como se vio en un tema anterior, existen dos *sub-modelos lógicos* dentro del formato vectorial, el formato arco-nodo que es el más utilizado y el modelo orientado a objetos.

En el formato vectorial, además de codificar la posición de las entidades, necesitamos establecer las relaciones topológicas entre las mismas, especialmente en lo que se refiere a los mapas de polígonos. El término **topología** hace referencia, en el contexto de los S.I.G. vectoriales, a relaciones entre los diferentes objetos para originar entidades de orden superior. Aunque los requisitos topológicos varían en función de cada implementación Concreta (modelo digital o estructura de datos), básicamente son:

1. Los nodos de dos líneas en contacto deben tener las mismas coordenadas.
2. Un polígono se define, en el modelo arco-nodo, como un circuito perfecto de líneas que puede recorrerse entero empezando y terminando en el mismo punto sin pasar dos veces por la misma línea.
3. Existe un sólo identificador para cada entidad y este es único, no se repite en ninguna otra entidad.
4. Se dispone de algún modo de codificar la polígona isla. Se trata de los polígonos completamente rodeados por otro polígono debiéndose *informar* al *polígono contenedor* de la existencia del *polígono isla* para tenerlo en cuenta al calcular su área.

Finalmente hay que tener en cuenta la necesidad de incorporar la información espacial o no espacial no extraíble directamente de la localización. Para ello se utiliza una base de datos temática asociada en las que una de las columnas corresponde al identificador de los objetos representados. En algunos casos se incluye información derivada de la localización (área, perímetro) en esta tabla para utilizarla en operaciones matemáticas junto con el resto de las variables, a este modo de trabajo se le llama modelo *geo-relacional*.

El ejemplo más sencillo sería la simple asignación de colores para pintar los polígonos en función del valor obtenido para una determinada variable, almacenada en la base de datos, en cada uno de los polígonos. (Figura 8. 14)

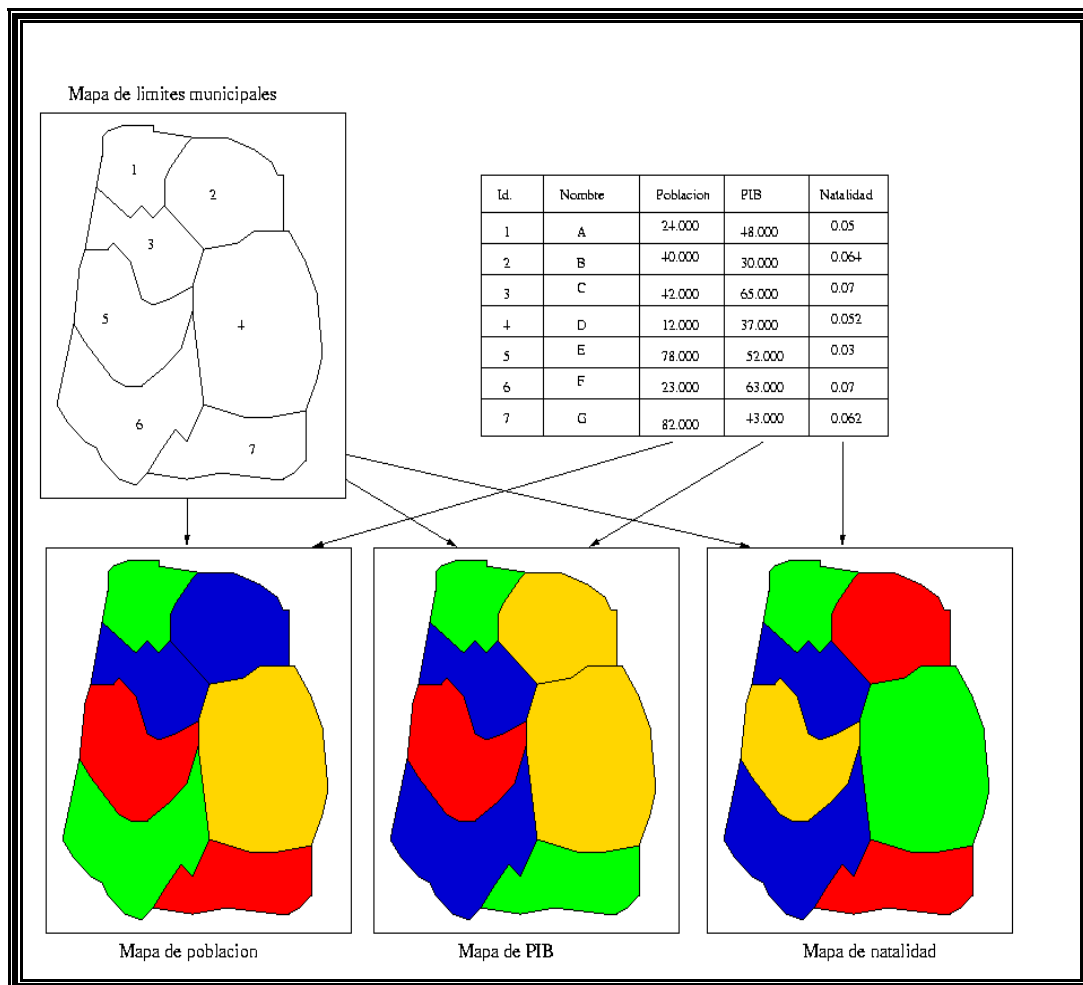


Figura 8. 14. Modelo de datos Geo-relacional.

8.5.1. MODELOS DIGITALES VECTORIALES.

Mientras que el formato raster se basa en una matriz de datos cuya codificación es, más o menos, similar en cualquier programa, uno de los problemas del formato vectorial es que el paso del modelo lógico al digital puede llevarse a cabo de modos muy diversos que dependen del programa con que se trabaje. Además el formato vectorial tiene multitud de pequeñas dificultades, como la mencionada polígona isla, que deben codificarse de alguna manera específica.

El resultado es un gran número de problemas en la importación y exportación de mapas de unos modelos digitales a otros. Cuanto más *completo* sea el mapa (incluyendo topología y base de datos enlazadas) más difícil será el cambio de formato.

8.2.1. MODELO VECTORIAL EN ARC/INFO.

Los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G) permiten registrar esta y otras relaciones como la conectividad y derivar otras a través de operaciones de análisis espacial como la proximidad, inclusión, intersección, etc. A este respecto, el modelo vectorial topológico ofrece más posibilidades que el raster, ya que registra de forma explícita alguna de las relaciones elementales. En el modelo raster la única relación topológica posible es la vecindad de una celda con sus 4 u 8 vecinas, haciendo esto más complejo la obtención de relaciones entre objetos del terreno.

Actualmente existen numerosas "marcas" de S.I.G disponibles en el mercado. Sin embargo hay una que acapara a la mayoría de usuarios. Esta es ARC/INFO de ESRI.

En 1994 había alrededor de 30.000 usuarios registrados lo que hace pensar que, actualmente, cinco años después, esta cifra se habrá duplicado.

Si tenemos en cuenta que esta no es una herramienta común, como pueden ser los procesadores de texto, antivirus, etc., este número debe tenerse muy en serio.

Algunas de las herramientas S.I.G que comparten el mercado (aunque mínimamente) con ARC/INFO son Intergraph, Enghouse, ERDAS, EPS, Genasys, IBM, Strategic Mapping, MapInfo y GDS.

Actualmente no hay ninguna otra marca de S.I.G que tenga mayor masa crítica de usuarios y mayor número de aplicaciones exitosas. Nótese que mientras en las cifras de ventas de productos S.I.G, otras empresas contaban sus ingresos incluyendo sistemas S.I.G de distintos tipos y aplicaciones afines (CAD, teledetección, etc.), ESRI sólo contaba con ARC/INFO, pese a lo cual es el líder indiscutible.

ARC/INFO es un paquete integrado de programas especializados en el manejo de la información geográfica.

ARC/INFO fue diseñado especialmente para la captura, análisis, consulta y representación de los datos espaciales por ESRI (Environmental Systems Research Institute) como un sistema abierto y programable que constituye toda una caja de herramientas para las ciencias geográficas y aéreas afines.

ARC/INFO permite trabajar con datos provenientes de posicionadores de satélite de cualquier marca, estaciones totales y equipo geodésico en general para el procesamiento de los datos geográficos y geodésicos.

Es un sistema de información geográfica con la capacidad de integrar los datos espaciales y tabulares dentro de su propia arquitectura o bien puede asociarlos

directamente con los datos almacenados en los principales gestores de bases de datos relacionales como DBase, Oracle, Informix, Sybase e Ingres entre otros.

ARC/INFO posee un manejo ágil entre estructuras de datos cartográficas para importar y exportar información. Soporta más de 35 formatos tales como: SIF, DIG, MOSS, ATLAS, IGES, DIME, ETAK, TIGER, IGDS, DXF, EPLI/, ERDAS-ian y gis, TIFF:RLC, GRASS, etc.

ARC/INFO es el software S.I.G principal. Es completamente relacional, abierto, extensible y el corazón de la solución S.I.G de cualquier empresa. ARC/INFO es usado por diferentes organizaciones para la realización de tareas tales como la planificación de la venta de suelo, análisis de la competencia o toma de decisiones en las rutas de vehículos. El uso de ARC/INFO por parte de gobiernos incluye la administración de terreno, manejo de vehículos de emergencia en tiempo real, diseño de parques, etc.

Comerciantes, gobiernos, educadores, investigadores y miles de profesionales de los S.I.G utilizan ARC/INFO para conseguir eficiencia en sus operaciones, incrementar la fiabilidad y aprovechar la verdadera potencia de sus bases de datos para la toma de decisiones.

ARC/INFO incluye las herramientas para la automatización e integración de datos espaciales. Contiene un conjunto de datos de entrada y herramientas de edición. Permite realizar producciones cartográficas potentes, composiciones de mapas interactivos, etc.

ARC/INFO permite al usuario acceder, integrar, visualizar, analizar y producir un mundo de información. Ofrece una completa solución para la automatización, gestión y visualización de los datos geográficos y asociados, los cuales pueden ser usados por cualquier organización que trabaje con información espacial.

El software ARC/INFO permite integrar los datos de un mapa de vectores (coordenadas x, y), imágenes raster tales como fotografías, documentos escaneados o imágenes satélite, dibujos CAD, datos de vídeo y sonido, etc.

CAPITULO 9.

APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

9.1. INTRODUCCIÓN.

Administrar, regular, controlar y planificar las acciones que se desarrollan en un territorio determinado constituye una tarea muy compleja. En este sentido, identificar las variables que intervienen en el proceso de administración, permite conocer una parte del problema, paralelamente resulta imprescindible comprender y analizar las interrelaciones que existen entre esas variables. De este modo es posible construir no sólo el escenario de comportamiento en un momento dado, sino simular comportamientos posibles, deseados o no, para en conducir la gestión en el sentido deseado; o en el peor de los casos, poder reaccionar a tiempo ante situaciones imprevistas.

No es suficiente comprender el fenómeno sobre el que hay que accionar, es necesario haber acordado un marco conceptual y metodológico que evidencie la problemática y permita definir un rumbo, disponer de los datos necesarios para abordar el problema, sistematizar y procesar estos datos en información utilizable, y además, contar con las herramientas que permitan manejar y actualizar esta información en el tiempo y el espacio pertinente.

El campo de la planeación se define principalmente desde la acción que se anticipa a los fenómenos del entorno, por lo que la modelación se hace indispensable. Además, hoy es necesario predecir de modo continuo, y para esto hay que contar con tecnología digital que colabore en la realización de modelos de situaciones para garantizar una adecuada toma de decisiones.

La tecnología de Sistemas de Información Geográfica, constituye en este sentido una de las herramientas adecuadas de manejo de información, ya que al usar el modelo de base de datos georrelacional se asocia un conjunto de información gráfica en forma de planos o mapas a bases de datos digitales.

Esto, sintéticamente quiere decir que los S.I.G. tienen como característica principal que el manejo de la información gráfica y alfanumérica se realiza de forma integrada, pudiendo abordar de este modo aspectos de alta complejidad relacional en el tema planteado.

Disponer de esa capacidad de comprensión y manejo de la complejidad, incluye el entendimiento de que también se ha modificado la dimensión del tiempo. La

posibilidad de afrontar en forma dinámica y acelerada los fenómenos se presenta como otro de los importantes desafíos conceptuales y prácticos. La idea de contar con la información pertinente en el momento oportuno y en el lugar oportuno constituye otra fuerza vital.

Más aún, no sólo es importante disponer de la estructura necesaria para la construcción, actualización y operación integral de bases de datos y viabilidad de la información, tendiendo a su manejo en tiempo real, sino que además, se requiere incorporar el concepto de *información en proceso*, haciendo referencia a la idea de información activa; es decir, tender a la construcción automática y veloz de información para optimizar los modelos haciéndolos también automáticos.

Por estos motivos, relacionar los datos alfanuméricos con los gráficos es uno de los principales desafíos técnicos. Antes, se elaboraban modelos con programas informáticos simples que permitían arribar a resultados importantes, pero que perdían su capacidad automática y relacional cuando había que modificar la mínima información de algún plano o mapa; precisamente por la ausencia de una base de datos que articulara los datos gráficos y alfanuméricos.

La construcción de modelos y programas informáticos con alta capacidad en el manejo de los datos pueden constituirse en vehículos de socialización, no sólo de la propia información generada, sino de las herramientas adecuadas que faciliten que la toma de decisiones se realice en el momento adecuado con los actores pertinentes.

Indudablemente la tecnología S.I.G. permite solucionar amplias necesidades técnicas y al mismo tiempo, su uso ha impulsado a una modificación estructural del accionar teórico/práctico en el planeamiento de estas soluciones.

9.2 DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Un S.I.G. se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos. Los S.I.G. son una nueva tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato.

Existen otras muchas definiciones de S.I.G., algunas de ellas acentúan su componente de base de datos, otras sus funcionalidades y otras enfatizan el hecho de ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, pero todas coinciden en referirse a un S.I.G. como un sistema integrado para trabajar con

información espacial, herramienta esencial para el análisis y toma de decisiones en muchas áreas vitales para el desarrollo nacional, incluyendo la relacionada con la infraestructura de un municipio, estado o incluso a nivel nacional.

Aunque al leer algunas definiciones de los Sistemas de Información Geográfica se puede pensar que es algo muy complejo, en realidad resulta sencillo de comprender si se percibe a un S.I.G. como un programa de cómputo, un software con funciones específicas. En este sentido un S.I.G. es igual que una hoja de cálculo o un procesador de textos, solo que para el caso de los S.I.G. se tienen programas como Arcinfo, Geomedia o Geographics, por citar solo a algunos.

En términos prácticos, la función principal de este software es contar con cartografía con bases de datos asociadas, con la misión principal de resolver problemas espaciales o territoriales; es decir, un programa que permita manejar conjuntamente la cartografía y las bases de datos alfanuméricas asociadas.

Dicho de esta manera se podría pensar en un CAD como Autocad, Microstation u otros que permiten asociar bases de datos a los elementos del dibujo. Pero la diferencia fundamental estriba que con un S.I.G. es posible realizar análisis de la cartografía para generar nueva cartografía en función de los resultados obtenidos, además de hacer consultas más completas al poder combinar criterios alfanuméricos y espaciales.

Otras definiciones más académicas hacen hincapié en el S.I.G. como disciplina o ciencia aplicada, incluyen en su formulación no solo al software sino también el hardware, equipo técnico y filosofía de trabajo integrándolo todo de una forma global. Una de las más citadas es la del National Center for Geographic Information and Analysis, N.C.G.I.A.: "un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión".

La definición del diccionario de la Association for Geographic Information (AGI) y el Departamento de Geografía de la Universidad de Edimburgo lo explica como: "un sistema de cómputo para obtener, almacenar, integrar, manipular, analizar y representar datos relativos a la superficie terrestre".

De estas definiciones se puede extraer que la importancia de los S.I.G radica en que las soluciones para muchos problemas frecuentemente requieren acceso a varios tipos de información que sólo pueden ser relacionadas por geografía o distribución espacial. Sólo la tecnología S.I.G permite almacenar y manipular información usando geografía para analizar patrones, relaciones y tendencias en la información, todo tendiente a contribuir a tomar mejores decisiones.

9.2.1 COMPONENTES DE UN S.I.G.

- ✓ Hardware
- ✓ Software
- ✓ Información
- ✓ Personal
- ✓ Métodos

Hardware

Los S.I.G. corren en un amplio rango de tipos de computadoras desde equipos centralizados hasta configuraciones individuales o de red, una organización requiere de hardware suficientemente específico para cumplir con las necesidades de aplicación.

Software.

Los programas S.I.G. proveen las herramientas y funcionalidades necesarias para almacenar, analizar y mostrar información geográfica, los componentes principales del software S.I.G. son:

- ✓ Sistema de manejo de base de datos.
- ✓ Una interfase grafica de usuarios (IGU) para el fácil acceso a las herramientas.
- ✓ Herramientas para captura y manejo de información geográfica.
- ✓ Herramientas para soporte de consultas, análisis y visualización de datos geográficos.

Actualmente la mayoría de los proveedores de software S.I.G distribuyen productos fáciles de usar y pueden reconocer información geográfica estructurada en muchos formatos distintos.

Información.

El componente más importante para un S.I.G es la información. Se requiere de adecuados datos de soporte para que el S.I.G pueda resolver los problemas y contestar a preguntas de la forma mas acertada posible. La consecución de datos correctos generalmente absorbe entre un 60 y 80% del presupuesto de implementación del S.I.G, y la recolección de los datos es un proceso largo que frecuentemente demora el desarrollo de productos que son de utilidad. Los datos geográficos y alfanuméricos pueden obtenerse por recursos propios u obtenerse a través de proveedores de datos. Mantener, organizar y manejar los datos debe ser política de la organización.

Personal

Las tecnologías S.I.G son de valor limitado si no se cuenta con los especialistas en manejar el sistema y desarrollar planes de implementación del mismo. Sin el personal experto en su desarrollo, la información se desactualiza y se maneja erróneamente, el hardware y el software no se manipula en todo su potencial.

Métodos

Para que un S.I.G. tenga una implementación exitosa debe basarse en un buen diseño y reglas de actividad definidas, que son los modelos y practicas operativas exclusivas en cada organización.

Funciones De Los S.I.G.

Los programas S.I.G. tienen una serie de funciones diseñadas para la gestión de información geográfica:

Captura, registro y almacenamiento de datos: el paso de información analógica, en papel, a formato digital de una computadora; esto se puede realizar de varias maneras como digitalización, vectorización, importación y otras.

Estructuración de datos y manipulación: creación de bases de datos, de nueva cartografía.

Proceso, análisis y gestión de datos: topología, consultas gráficas, alfanuméricas, combinadas, superposición de planos e información.

Creación de salidas: impresión de informes, graficación de planos y publicación en diversos formatos electrónicos.

Cuestiones A Las Que Responde Un S.I.G.

Localización ¿Qué hay en...?

Condición ¿Dónde sucede que...?

Tendencias ¿Qué ha cambiado...?

Rutas ¿Cuál es el camino óptimo...?

Pautas ¿Qué pautas existen...?

Modelos ¿Qué ocurriría si...?

Estas cuestiones son de interés primordial en actividades relacionadas con la planificación. Para instituciones de investigación, los S.I.G contribuyen en el estudio de la distribución y monitoreo de recursos, tanto naturales como humanos, tecnológicos, de infraestructura y sociales así como en la evaluación del impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente respectivo. De esta forma se contribuye; por ejemplo, en la planeación de actividades destinadas a la preservación de los recursos naturales.

Toda la generación de nueva información que puede proveer un S.I.G depende Significativamente de la información que posee la base de datos disponible. La calidad de esta base de datos y sus contenidos determinan la cantidad y calidad de los resultados obtenidos del S.I.G.

9.3 FUNCIONAMIENTO DE LOS S.I.G.

La construcción e implementación de un S.I.G. en cualquier organización es una tarea siempre progresiva, compleja, laboriosa y continúa. Los análisis y estudios anteriores a la implantación de un S.I.G. son similares a los que se deben realizar para establecer cualquier otro sistema de información; sin embargo, en los S.I.G. hay que considerar las características especiales de los datos utilizados y sus correspondientes procesos de actualización.

Es indiscutible que los datos son el principal activo de cualquier sistema de información. Por ello el éxito y la eficacia de un S.I.G. se miden por el tipo, la calidad y vigencia de los datos con los que opera.

Los esfuerzos y la inversión necesaria para crear las bases de datos y tener un S.I.G. eficiente y funcional no son pequeños, aunque tampoco Significa una gran inversión. Es un esfuerzo permanente por ampliar y mejorar los datos almacenados, utilizando las herramientas más eficientes para tal propósito.

La información geográfica contiene una referencia territorial explícita como latitud y longitud o una referencia implícita como domicilio o código postal. Las referencias implícitas pueden ser derivadas de referencias explícitas mediante geocodificación.

Los S.I.G. funcionan con dos tipos diferentes de información geográfica: el modelo vector y el modelo raster.

El modelo raster funciona a través de una retícula que permite asociar datos a una imagen; es decir, se pueden relacionar paquetes de información a los píxeles de una imagen digitalizada.

En el modelo vector, la información sobre puntos, líneas y polígonos se almacena como una colección de coordenadas x, y . La ubicación de una característica puntual, pueden describirse con un sólo punto x, y . Las características lineales, pueden almacenarse como un conjunto de puntos de coordenadas x, y .

Las características poligonales, pueden almacenarse como un circuito cerrado de coordenadas.

Hoy en día el condicionante principal a la hora de afrontar cualquier proyecto basado en S.I.G. lo constituye la disponibilidad de datos geográficos del territorio a estudiar, mientras que hace diez años lo era la disponibilidad de computadoras potentes que permitieran realizar los procesos de cálculo involucrados en el análisis de datos territoriales.

Pero además de ser un factor limitante, la información geográfica es a su vez el

elemento diferenciador de un Sistema de Información Geográfica frente a otro tipo de Sistemas de Información; así, la particular naturaleza de este tipo de información contiene dos vertientes diferentes: por un lado está la vertiente espacial y por otro la vertiente temática de los datos. Mientras otros Sistemas de Información contienen sólo datos alfanuméricos (nombres, direcciones, números de cuenta, etc.), las bases de datos de un S.I.G. integran además la delimitación espacial de cada uno de los objetos geográficos.

Por ejemplo, un lago que tiene su correspondiente forma geométrica plasmada en un plano, tiene también otros datos asociados como niveles de contaminación, flora, fauna, pesca y niveles de captación en relación a la temporada del año.

Otro ejemplo podría ser el contar con un suelo definido en los planos de clasificación de un plan maestro de desarrollo. Este suelo urbanizable tiene una serie de atributos, tales como su uso, su sistema de gestión, su edificabilidad, sus características mecánicas, etc. Pero además, tiene una delimitación espacial concreta correspondiente con su propia geometría definida en el plano.

Por tanto, el S.I.G. tiene que trabajar a la vez con ambas partes de información: su topografía perfectamente definida en plano y sus atributos temáticos asociados. Es decir, tiene que trabajar con cartografía y con bases de datos a la vez, uniendo ambas partes y constituyendo con todo ello una sola base de datos geográfica.

De esta manera, se define a la topología como esta capacidad de asociación de bases de datos temáticas junto con la descripción espacial precisa de objetos geográficos y las relaciones entre ellos y es precisamente la topología lo que diferencia a un S.I.G de otros sistemas informáticos de gestión de información.

9.4 CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS GEOGRÁFICAS.

La construcción de una base de datos geográfica implica un proceso de abstracción para pasar de la complejidad del mundo real a una representación simplificada que pueda ser procesada por el lenguaje de las computadoras actuales.

Este proceso de abstracción tiene diversos niveles y normalmente comienza con la concepción de la estructura de la base de datos, generalmente en capas; en esta fase, y dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, se seleccionan las capas temáticas a incluir.

Pero la estructuración de la información espacial procedente del mundo real en capas conlleva cierto nivel de dificultad. En primer lugar, la necesidad de abstracción que requieren las máquinas implica trabajar con primitivas básicas de dibujo, de tal forma que toda la complejidad de la realidad ha de ser reducida a puntos, líneas o polígonos.

En segundo lugar, existen relaciones espaciales entre los objetos geográficos que el sistema no puede obviar; la topología, que en realidad es el método matemático-lógico usado para definir las relaciones espaciales entre los objetos geográficos puede llegar a ser muy compleja, ya que son muchos los elementos que interactúan sobre cada aspecto de la realidad.

La topología de un S.I.G. reduce sus funciones a cuestiones mucho más sencillas, como por ejemplo conocer el polígono (o polígonos) a que pertenece una determinada línea, o bien saber qué agrupación de líneas forman una determinada carretera.

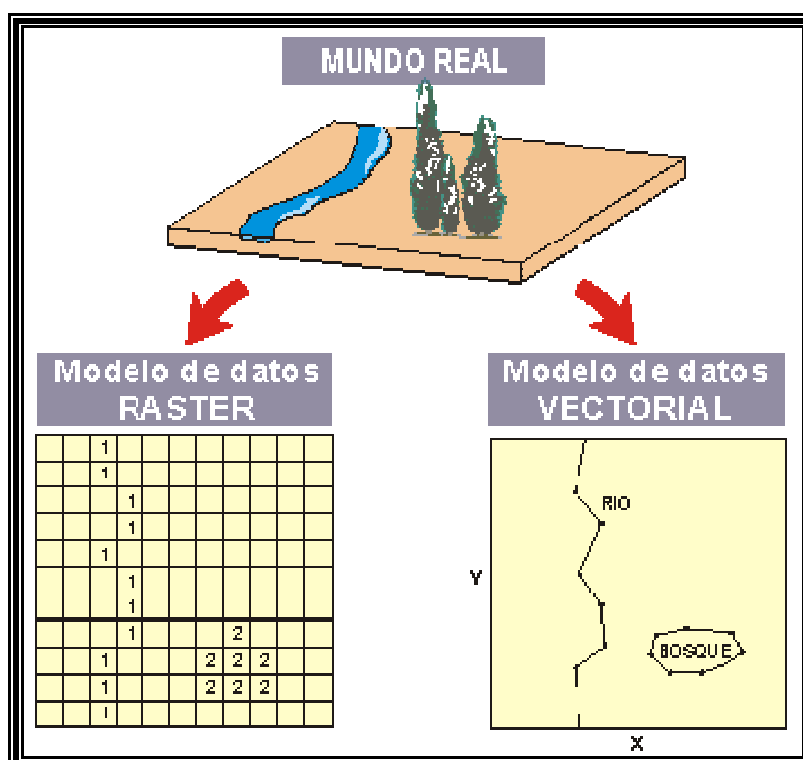


Figura 8. 15. Formato vectorial Vs Raster.

Existen diversas formas de modelar estas relaciones entre los objetos geográficos o topología. (Figura 8. 15)⁵⁸

Dependiendo de la forma en que ello se lleve a cabo se tiene uno u otro tipo de Sistema de Información Geográfica dentro de una estructura de dos grupos principales: S.I.G. vectoriales y S.I.G. Raster. No existe un modelo de datos que sea superior a otro, sino que cada uno tiene una utilidad específica.

58

http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_field_guide/B_proyecciones_cartograficas.pdf

9.5 TOPOLOGÍAS, MODELOS DE DATOS Y TIPOS DE S.I.G.

S.I.G. Vectoriales.

Son aquellos Sistemas de Información Geográfica que para la descripción de los objetos geográficos utilizan vectores (líneas) definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico.

Con un par de coordenadas se define un punto, con dos puntos se genera una línea, y con una agrupación de líneas se forman polígonos. A estos objetos de dibujo ya se les puede asociar las diversas capas de información que se relacionan con el modelo espacial generado a través de puntos y líneas.

S.I.G. Raster

Los Sistemas de Información Raster basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos. Su forma de proceder es dividir la zona de afección de la base de datos en una retícula o malla regular de pequeñas celdas (pixeles) y atribuir un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático. Dado que la malla es regular, el tamaño del pixel es constante y se conoce la posición en coordenadas del centro de una de las celdas, se puede decir que todos los pixeles están georreferenciados.

Para tener una descripción precisa de los objetos geográficos contenidos en la base de datos el tamaño del pixel debe ser reducido en función de la escala, lo que dotará a la malla de una resolución alta; sin embargo, a mayor número de filas y columnas en la malla, mayor esfuerzo en el proceso de captura de la información y mayor costo computacional al momento de procesarla. (Figura 8. 16)⁵⁹



Figura 8. 16. Organización de la información en el modelo raster

59

http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_field_guide/B_proyecciones_cartograficas.pdf

El modelo de datos raster es útil cuando tenemos que describir objetos geográficos con límites difusos, como por ejemplo puede ser la dispersión de una nube de contaminantes, o los niveles de contaminación de un acuífero subterráneo, donde los contornos no son absolutamente nítidos; en esos casos, el modelo raster es más apropiado que el vectorial.

9.6. ALCANCES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Como se ha visto, los S.I.G constituyen una herramienta muy poderosa para la gestión de información y su relación con algo tan tangible como un predio, un río o una obra de desarrollo urbano. Sin embargo, es muy importante conocer los alcances de un sistema como este para aprovechar sus potencialidades al máximo utilizándolo como una referencia más en el delicado proceso de toma de decisiones de la empresa, el gobierno y las asociaciones civiles.

De esta manera se pueden identificar algunas de las capacidades los S.I.G como herramienta en los procedimientos de gestión.

Un S.I.G permite:

- ✓ Realizar un gran número de manipulaciones, sobresaliendo las superposiciones de mapas, transformaciones de escala, la representación gráfica y la gestión de bases de datos.
- ✓ Consultar rápidamente las bases de datos, tanto espacial como alfanumérica, almacenadas en el sistema.
- ✓ Realizar pruebas analíticas rápidas y repetir modelos conceptuales en despliegue espacial.
- ✓ Comparar eficazmente los datos espaciales a través del tiempo (análisis temporal).
- ✓ Efectuar algunos análisis, de forma rápida que hechos manualmente resultarían largos y molestos.
- ✓ Integrar en el futuro, otro tipo de información complementaria que se considere relevante y que este relacionada con la base de datos nativa u original.

9.7. TECNOLOGÍAS RELACIONADAS CON LOS S.I.G.

Los sistemas de Información Geográfica comparten características con otros sistemas de información pero su habilidad de manipular y analizar datos geográficos los distingue del resto. La siguiente sería una forma de clasificar los sistemas de información con los que se relaciona los S.I.G.:

- ⊕ Mapeo de escritorio
- ⊕ Herramientas CAD
- ⊕ Sensores remotos
- ⊕ Sistemas Manejadores de Bases de Datos

Mapeo de Escritorio

Se caracteriza por utilizar la figura del mapa para organizar la información utilizando capas e interactuar con el usuario, el fin es la creación de los mapas y estos a su vez son la base de datos, tienen capacidades limitadas de manejo de datos, de análisis y de personalización. Podría entenderse como los inicios de la tecnología de sistemas de información geográfica.

Herramienta CAD

Se utilizan especialmente para crear diseños y planos de construcción tanto de manufactura como de obras de infraestructura, estos sistemas no requieren de componentes relacionales ni herramientas de análisis, las herramientas CAD actualmente se han ampliado como soporte para mapas, pero tienen utilidad limitada para analizar y soportar bases de datos geográficas grandes.

Sensores Remotos

Se definen como la técnica de adquisición y procesamiento digital posterior de los datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, en virtud de la interacción electromagnética existente entre la tierra y el sensor.

9.8. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

En la mayoría de los sectores los S.I.G pueden ser utilizados como una herramienta de ayuda a la gestión y toma de decisiones, a continuación se describen brevemente algunas de sus aplicaciones principales:

Cartografía automatizada.

Las entidades públicas han implementado este componente de los S.I.G en la construcción y mantenimiento de planos digitales de cartografía. Dichos planos son puestos a disposición de las empresas a las que puedan resultar de utilidad estos productos con la condición de que estas entidades se encargan posteriormente de proveer versiones actualizadas de manera periódica.

Infraestructura.

Algunos de los primeros sistemas S.I.G fueron utilizados por las empresas encargadas del desarrollo, mantenimiento y administración de redes de electricidad, gas, agua, teléfono, alcantarillado, etc.; en este caso, los sistemas S.I.G almacenan información alfanumérica de servicios relacionados con las distintas representaciones gráficas de los mismos. Estos sistemas almacenan información relativa a la conectividad de los elementos representados gráficamente, con el fin de realizar un análisis de redes.

La elaboración de mapas, así como la posibilidad de realizar una consulta combinada de información, ya sea gráfica o alfanumérica, son las funciones más comunes para estos sistemas, también son utilizados en trabajos de ingeniería, inventarios, planificación de redes, gestión de mantenimiento, entre otros.

Gestión territorial.

Son aplicaciones S.I.G dirigidas a la gestión de entidades territoriales y permiten un rápido acceso a la información gráfica y alfanumérica, y suministran herramientas para el análisis espacial de la información. Facilitan labores de mantenimiento de infraestructura, mobiliario urbano, etc., y permiten realizar una optimización en los trabajos de mantenimiento de empresas de servicios. Tienen la facilidad de generar documentos con información gráfica y alfanumérica.

Medio ambiente.

Son aplicaciones implementadas por instituciones de medio ambiente, que facilitan la evaluación del impacto ambiental en la ejecución de proyectos. Integrados con sistemas de adquisición de datos permiten el análisis en tiempo real de la concentración de contaminantes, a fin de tomar las precauciones y medidas del

caso. Facilitan una ayuda fundamental en trabajos tales como reforestación, explotaciones agrícolas, estudios de representatividad, caracterización de ecosistemas, estudios de fragmentación, estudios de especies, etc.

Equipamiento social.

Implementación de aplicaciones S.I.G dirigidas a la gestión de servicios de impacto social, tales como servicios sanitarios, centros escolares, hospitales, centros deportivos, culturales, lugares de concentración en casos de emergencias, centros de recreo, entre otros y suministran información sobre las sedes ya existentes en una determinada zona y ayudan en la planificación en cuanto a la localización de nuevos centros. Un buen diseño y una buena implementación de estos S.I.G aumentan la productividad al optimizar recursos, ya que permiten asignar de forma adecuada y precisa los centros de atención a usuarios cubriendo de forma eficiente la totalidad de la zona de influencia.

Recursos mineros.

El diseño de estos S.I.G facilitan el manejo de un gran volumen de información generada en varios años de explotación intensiva de un banco minero, suministrando funciones para la realización de análisis de elementos puntuales (sondeos o puntos topográficos), lineales (perfiles, tendido de electricidad), superficies (áreas de explotación) y volúmenes (capas geológicas). Facilitan herramientas de modelación de las capas o formaciones geológicas.

Ingeniería de Tránsito.

Sistemas de Información Geográfica utilizados para modelar la conducta del tráfico determinando patrones de circulación por una vía en función de las condiciones de tráfico y longitud. Asignando un costo a los o puntos en los que puede existir un semáforo, se puede obtener información muy útil relacionada con análisis de redes.

Demografía

Se evidencian en este tipo de S.I.G. un conjunto diverso de aplicaciones cuyo vínculo es la utilización de las variadas características demográficas, y en concreto su distribución espacial, para la toma de decisiones. Algunas de estas aplicaciones pueden ser: el análisis para la implantación de negocios o servicios públicos, zonificación electoral, etc. El origen de los datos regularmente corresponde a los censos poblacionales elaborados por alguna entidad gubernamental; para el caso de México el organismo encargado de la procuración de datos generales es el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, este grupo de aplicaciones no obligan a una elevada precisión, y en general, manejan escalas pequeñas.

GeoMarketing.

La base de datos de los clientes potenciales de determinado producto o servicio relacionada con la información geográfica resulta indispensable para planificar una adecuada campaña de marketing o el envío de correo promocional, se podrían diseñar rutas óptimas a seguir por comerciales, anuncios espectaculares, publicidad móvil, etc.

Banca.

Los bancos son buenos usuarios de los S.I.G debido a que requieren ubicar a sus clientes y planificar tanto sus campañas como la apertura de nuevas sucursales incluyendo información sobre las sucursales de la competencia.

Planimetría.

La planimetría tiene como objetivo la representación bidimensional del terreno proporcionándole al usuario la posibilidad de proyectar su trabajo sobre un papel o en pantalla sin haber estado antes en el sitio físico del proyecto. El fin de la planimetría es que el usuario tenga un fácil acceso a la información del predio; por ejemplo, saber qué cantidad de terrenos desocupados se encuentran en el lugar, o qué cantidad de postes telefónicos necesita para ampliar su red, o qué cantidad de cable necesita para llegar hasta un cliente, o emplearlo en soluciones móviles, o utilizarlo como plataforma de archivos GIS. En otras palabras, permite el usuario visualizar de forma clara y con gran exactitud la información que se encuentra dentro de su proyecto. Existen distintos tipos de planimetría, que van de la mas básica a la más completa. La elección del tipo de planimetría depende del tipo de información que el usuario vaya a necesitar para su proyecto.

Cartografía Digital 3D.

Este tipo de información tridimensional de construcciones civiles, es requerida para realizar, por ejemplo, la planeación de la cobertura de las ondas de radio en una población ubicando los rebotes de ondas radiales entre antenas, optimización de redes, ubicación de antenas, interferencias de radio frecuencia, tendido de líneas de transmisión en 3D; o en el caso de la planeación de un aeropuerto este modelado tridimensional permitiría realizar el estudio de los espacios aéreos que intervienen en el proceso de diseño referenciado, en su caso, la viabilidad técnica de su construcción.

9.3. EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS TECNOLÓGICOS Y SU APLICACIÓN EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

El crecimiento no controlado en el proceso urbano, aunado al incumplimiento de ordenanzas de usos del suelo y a la carente aplicación de planificación en diferentes lugares del país ha generado, entre otras consecuencias, la combinación de usos industriales y residenciales en un mismo espacio.

Es posible que bajo estas características, ocurran eventos o emergencias que puedan poner en peligro la salud y vida de las personas que residen, trabajan y/o circulan en los alrededores de las instalaciones industriales.

Metodológicamente, la evaluación de los riesgos tecnológicos de las zonas industriales y su entorno urbano, se puede realizar mediante la combinación de dos componentes fundamentales: la amenaza y la vulnerabilidad. Para las amenazas técnicas se establece el nivel de peligro y la magnitud de accidentes potenciales en los distintos tipos de industrias, para el caso de la vulnerabilidad se caracteriza las variables de población, uso del suelo y líneas vitales susceptibles a ser afectadas.

Se genera la jerarquización de los diferentes niveles de riesgo tecnológico en el sector, con la finalidad de crear escenarios posibles ante la presencia de un accidente mayor y así proponer medidas o acciones necesarias para prevenir, mitigar y preparar a la población frente a una emergencia industrial.

Debido a factores como la participación de personal altamente especializado y a la poca accesibilidad a las industrias, se hace necesario elaborar una metodología cualitativa para abordar los riesgos tecnológicos asociados con las zonas industriales y sus implicaciones en su entorno urbano.

Los parámetros más importantes a tomar en cuenta serán:

1. Evaluación de amenazas naturales: se trata la ubicación, severidad y posibilidad de que ocurra un evento natural dentro de un período de tiempo determinado.
2. Evaluación de vulnerabilidad: esta fase consiste en caracterizar y evaluar los daños a la población, propiedad e interrupción de las actividades económicas ante la presencia de un evento natural de cierta severidad.
3. Evaluación del riesgo: es donde se determinan cuantitativamente, las posibles pérdidas humanas, económicas y daños a las propiedades dado un evento natural determinado.

Se Extrapolan los parámetros anteriores para evaluar los riesgos naturales se presentan las fases siguiendo los parámetros sobre riesgos tecnológicos en La las industrias:

🌐 Identificación y evaluación de niveles de amenazas tecnológicas:

En análisis de las amenazas se elabora mediante la recolección de datos en dos fuentes primordiales:

- ⊕ Fuentes primarias: visitas a las industrias, ubicadas en la zona a estudiar y para conocer los diferentes procesos que se llevan.
- ⊕ Las fuentes secundarias se tomaran de documentos bibliográficos como el Manuales de protección civil por citar un ejemplo, las consultas a expertos en la materia de seguridad industrial, las cuales permiten recabar los datos de las industrias

Esta información se ingresara a una matriz agrupando las industrias en tipos y subtipos similares en relación a los siguientes aspectos: materia prima, almacenamiento del insumo, productos y caracterización de los procesos para señalar las áreas más críticas en los mismos, con el objeto de identificar y evaluar cualitativamente las diversas amenazas como incendio, explosión y derrames, estableciendo además, los niveles de peligrosidad mediante una clasificación según la NOM en donde se destacan tres categorías:

- ⊕ Peligro leve: se presenta en instalaciones en donde se encuentran materiales de baja combustión y no existen facilidades para la propagación del fuego.
- ⊕ Peligro moderado: se involucran materiales que pueden arder con relativa rapidez, o que produzcan gran cantidad de humo.
- ⊕ Peligro alto: Materiales que pueden arder con rapidez, o donde se produzcan vapores tóxicos y/o existe la probabilidad de explosión.

Asimismo, para determinar las consecuencias de las amenazas potenciales sobre su entorno urbano se deben considerar dos aspectos fundamentales:

1. Para las diferentes industrias pintura se indicara el radio de afectación, que pudieran tener en caso de siniestro para esto debemos de extraer fuentes secundarias de información.
2. Se considerara el grado de peligrosidad de las plantas de mayor riesgo, las propiedades contiguas a ellas, así como la presencia de instalaciones críticas cercanas y el trazado de líneas vitales (sobre todo de gas) para establecer las áreas de similares amenazas técnicas y así zonificar los niveles de riesgo.

Identificación de las áreas vulnerables:

La caracterización de las áreas vulnerables a las amenazas técnicas se hace a través de un conjunto de variables como: la densidad de población por sectores, cantidad de trabajadores por industrias, uso del suelo y localización de las instalaciones críticas y líneas vitales para obtener los diferentes niveles de vulnerabilidad - susceptibilidad de estos elementos para sufrir daños.

Zonificación de áreas con similares riesgos:

La zonificación se realiza mediante la técnica de superposición de los mapas: de las amenazas técnicas y las variables implícitas en la vulnerabilidad que pueden verse afectadas en caso de una emergencia industrial, la coincidencia ponderada entre ambos destaca las zonas de mayor o menor riesgo.

Formulación de medidas y recomendaciones:

Son las medidas orientadas a la prevención, mitigación y preparación ante los riesgos tecnológicos en la zona de estudio y su entorno.

Generación de mapas temáticos de los riesgos tecnológicos.

Arc-view 3.2, es la herramienta empleada para la elaboración de los mapas de riesgo tecnológico. Los posibles accidentes tecnológicos, como un incendio, explosión o derrame de hidrocarburos pueden ser evaluados con un SIG. Este permite superponer datos geográficos para ser analizados y luego crear escenarios ante la presencia de un accidente mayor en la zona. El resultado de éste trabajo es el **Mapa de Zonificación de riesgos tecnológicos en la zona una industrial Implicaciones en su entorno urbano**, este se obtiene mediante la combinación de los mapas de amenaza y vulnerabilidad.

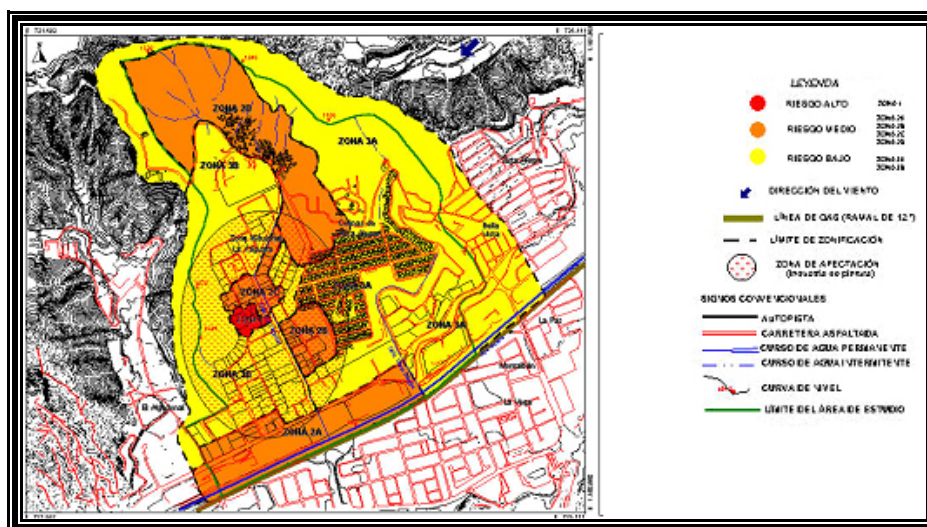


Figura 9. 1. Mapa de Zonificación de riesgos tecnológicos en la zona una industrial

Conclusiones.

- ⊕ La correcta planeación de un vuelo fotogramétrico, nos asegura una adecuada cobertura del área de estudio.
- ⊕ Los S.I.G. representan una nueva manera de manejar la información, haciéndola más comprensible y fácil de entender, debido a la facilidad de unificar las bases de datos y los datos gráficos y, presentarlos de una manera visual.
- ⊕ Resulta conveniente el uso de un S.I.G que permitan identificar de manera que se pueda publicar para el común de la población las rutas de evacuación, ubicación de albergues, centros de atención médica, etc. en caso de emergencias.
- ⊕ Los S.I.G, permiten sintetizar un marco teórico en el que se describe los pasos lógicos necesarios que concluirán con el éxito de su implantación siendo factible la utilización de diferentes áreas en donde se deba administrar información geográfica.
- ⊕ Los S.I.G mejoran la planificación territorial, por que permite el mejoramiento en la eficiencia del servicio, la tecnificación en la planeación para el desarrollo y la modernización de la gestión de servicios públicos en la sociedad.
- ⊕ Las aplicaciones de índole social que pueden tener los sistemas de información geográfica son de gran importancia, y resulta de gran beneficio promover su utilización tanto en el sector gubernamental como en la iniciativa privada.
- ⊕ A partir de la exposición de diferentes conceptos, se puede decir que un sistema de información geográfica es la interacción de una base de datos gráficos con una base de datos alfanumérica, esta interacción es a través de un identificador único. Tanto la base de datos gráfica (mapa) como la alfanumérica deben coincidir con este identificador, permitiendo así la interacción.
- ⊕ Una herramienta como un Sistema de Información Geográfica cumple con las expectativas que genera una institución que brinda servicios en donde tenga que ver la ubicación geográfica.
- ⊕ Con el apoyo de los sistemas de información geográfica se puede analizar, gestionar y planificar nuevos itinerarios en las rutas de transporte escolar de la universidad Autónoma del Estado de Hidalgo ya que se podría cubrir mayores rutas y tal vez con menos tiempo de recorrido.

BIBLIOGRAFÍA.

Alcántara García, Dante. 1990. Topografía. [aut. libro] Alcantara García Dante. México : Mc Graw Hill, 1990, págs. 451-507.

Anderson, M. 1987. Introducción a la topografía. *Introducción a la Topografía*. México : Mc Graw Hill, 1987, págs. 560-583.

Ávila Sánchez, Héctor. 1993. México Sigue en Riesgo Reto. de a Educacion. *México Sigue en Riesgo. Reto de a Educacion*. México : planeta, 1993, págs. 125-156.

Buzai D., Gustavo. 2003. Mapas Sociales Urbanas. *Mapas Sociales Urbanas*. Buenos Aires : Lugar, 2003, págs. 1-100.

C. Brinker, Russel y R. Wolf, Paul. 1982. Topografía moderna. *Topografía moderna*. México : Harla, 1982, págs. 160-195.

Carter, H. 1974. El estudio de la Geografía Urbana. [aut. libro] Carter H. *El estudio de la Geografía Urbana*. Madrid, España : s.n., 1974, págs. 32-62.

DOCUMENTOS ELECTRÓNICOS.

Atlas SIG Hyparion, S.L. . 2002. Diccionario de terminología Cartografica. [En línea] 15 de Mayo de 2002. [Citado el: 8 de Marzo de 2007.] <http://www.hyparion.com/>.

Cartodata. 2006. Fotogrametría y Geoinformática. [En línea] 01 de junio de 2006. [Citado el: 9 de mayo de 2007.] <http://es.cartodata.com>.

Delgado Lopez, Enrique. 2007. consejo mexicano de investegacion educativa. [En línea] enero de 2007. [Citado el: 23 de septiembre de 2007.] <http://www.comie.org.mx>.

Garcia Alántara, Dante. 1990. Topografía. mexico : Carbayon, 1990, págs. 25-50.

García Álvarez, José Antonio. 2004. La informacion que buscabas. [En línea] Diciembre de 2004. [Citado el: 13 de Agosto de 2007.] http://www.asifunciona.com/electronica/af_gps/af_gps_10.htm.

Leica Geosystem. 2007. Proyecciones Cartográficas. [En línea] 10 de Enero de 2007. [Citado el: 12 de Agosto de 2007.] http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_field_guide/B_proyecciones_cartograficas.pdf.

Mapping Interactivo. 2002. Revista Internacional de ciencias de la tierra. [En línea] 10 de enero de 2002. [Citado el: 22 de Febrero de 2007.] <http://www.mappinginteractivo.com>.

Rodrigo, pino. 2006. Bikemont. [En línea] Junio de 2006. [Citado el: 22 de enero de 2007.] <http://www.bikemontt.cl//index.php>.

Sedena. secretaria de la defensa nacional. [En línea] [Citado el: 21 de Marzo de 2007.] <http://www.sedena.gob.mx/index.php>.

Sistemas de Información Geográfica Municipal. 2006. SIG Merida Yucatan. [En línea] 2 de Febrero de 2006. [Citado el: 12 de mayo de 2007.] <http://www.merida.gob.mx/sig/>.

University Corporation for Atmospheric Research. 2007. Mide Tu mundo. [En línea] 22 de Agosto de 2007. [Citado el: 2007 de septiembre de 2007.] <http://www.midetumundo.org/eratosthenes.html>.

Wikimedia Foundation, Inc. 2007. Wikipedia. *La Enciclopedia libre*. [En línea] Octubre de 22 de 2007. [Citado el: 30 de Octubre de 25.] <http://es.wikipedia.org>.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acimut: Es el ángulo de una dirección contado en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte. El acimut de un punto hacia el este es de 90 grados y hacia el oeste de 270 grados. El término acimut sólo se usa cuando se trata del norte verdadero. Cuando se empieza a contar a partir del norte magnético se suele denominar rumbo o acimut magnético. En geodesia o topografía geodésica el acimut sirve para determinar la orientación de un sistema de triangulación.

Agrimensura: Es la rama de la topografía destinada a la delimitación de superficies, la medición de áreas y la rectificación de límites. A lo largo de la evolución de esta disciplina los agrimensores se han servido de diversos instrumentos específicos de su actividad. Entre ellos destacó durante Siglos la escuadra de agrimensor, que permitía establecer las dimensiones de diferentes ángulos en varias direcciones.

Altimetría: (también llamada **hipsometría**) es la parte de la Topografía que estudia el conjunto de métodos y procedimientos para determinar y representar la altura; también llamada "cota", de cada uno de los puntos, respecto de un plano de referencia. Con la Altimetría se consigue representar el relieve del terreno.

AM/FM (Autómata Mapping/Facilitéis Management) Mapeo Automatizado / Administración de Servicios Municipales.

Basculamiento: Se llama basculamiento al movimiento de algunas cámaras de gran formato que consiste en el giro del panel del objetivo (o de la película) en torno a su eje. Según cual sea este eje, podemos hablar de basculamiento horizontal, basculamiento vertical o doble basculamiento. El basculamiento permite controlar o alterar la forma, la perspectiva, el foco y la profundidad de campo.

Datum: pueda ser verificada (en caso contrario se trataría de una creencia) sistema geométrico de referencia empleado para expresar numéricamente la posición geodésica de un punto sobre el terreno.

Digitalización: operación de codificar la información en cifras la digitalización se aplica habitualmente a la codificación de la información gráfica (mapas y planos convencionales) pero puede ser aplicada con propiedad a todo tipo de información para la construcción de bases de datos digitales.

Elipsoide: Modelo matemático de la Tierra empleado para los cálculos geodésicos. Superficie generada al hacer girar una elipse sobre uno de sus ejes. Ya que la forma de la Tierra es distinta de un área geográfica a otra, para obtener el mejor ajuste, se usan distintos elipsoides para describir áreas particulares.

Esteromodelo: Representación de un conjunto de objetos y sus relaciones. Descripción de la realidad, en particular si nos permite hacer pronósticos o predicciones. Emulación, representación en miniatura y en 3D.

Fotogrametría: Técnica de medición de coordenadas 3D que utiliza fotografías u otros sistemas de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, como medio fundamental para la medición.

Geodesia: Ciencia cuyo objeto es la medición y descripción matemática del tamaño y forma de la tierra teniendo en cuenta sus campos gravitatorios y la localización precisa de puntos en su superficie.

GPS: GPS es una constelación de 24 satélites que giran alrededor de la tierra dos veces al día. Un receptor en tierra calcula su posición geográfica determinando su posición con respecto a un conjunto de al menos tres satélites. El receptor puede calcular la localización exacta, habitualmente con un error de un centímetro, de un objeto en la superficie de la tierra.

Grid. Red Ortogonal, retícula.

Mapa índice: Mapa de referencia que representa el entorno del área mapeada e identifica los mapas componentes o los mapas adyacentes.

marca fiducial:

MDT: *modelo digital de terreno* estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa se trata, por tanto, de un modelo digital que representa una propiedad cuantitativa topográfica (por ejemplo, elevación, pendiente) o no (temperatura de la superficie del terreno, reflectancia...)

MDE: El Modelo Digital de Elevación (MDE) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la elevación de la superficie del terreno. La unidad básica de información de un MDE es un valor de elevación Z, al que acompañan los valores correspondientes de X e Y, que expresados en un sistema de proyección geográfica permiten una precisa referenciación espacial.

S.I.G: sistemas de información geográfica Colección de hardware, software y datos geográficos diseñados para recoger, almacenar, actualizar, manipular, analizar y reproducir datos con referencias geográficas. El topógrafo es el que recoge, analiza y da cuenta de los datos geográficos. En combinación con los datos geográficos, un estudio S.I.G puede incluir otras colecciones de datos: cifra de ventas, ingresos, censo de población, propiedad inmobiliaria, incidencia de enfermedades.

Teledetección: proceso de captura de información a distancia, sin contacto entre el aparato de medida y el objeto se aplica habitualmente en un sentido más restringido a las imágenes o datos captados mediante sensores transportados por aviones o satélites; es común la extensión del concepto al análisis y la interpretación de la información, y no sólo a su captura

TIN: estructura vectorial usada para construir modelos digitales del terreno TAN son las Siglas de triangulated irregular network; se trata de una estructura de datos que representa el relieve mediante una red irregular de triángulos adosada al terreno, sin solapamientos y donde cada vértice se define por sus coordenadas espaciales (x,y,z).

Topología: referencia a las propiedades no métricas de un mapa en el contexto de los S.I.G, topología hace referencia a las propiedades de vecindad o adyacencia, inclusión, conectividad y orden, es decir, propiedades no métricas y que permanecen invariables ante cambios morfológicos, de escala o de proyección se dice que una estructura de datos es 'topológica' cuando incluye información explícita sobre estas propiedades; en este caso, es posible realizar análisis y consultas "topológicas" sin necesidad de acudir a las tablas de coordenadas.

Vectorial: modelo de datos en el que la realidad se representa mediante vectores o estructuras de vectores una estructura vectorial puede ser compleja: una cadena de vectores forma un arco; una cadena de arcos forma un anillo; uno o varios anillos definen un polígono se trata de un modelo de datos basado en objetos (geométricos) frente al modelo *raster*, basado en localizaciones.

Vectorizar: transformación de una estructura raster en una vectorial suele aplicarse a la operación de "rescatar" líneas a partir de documentos escaneados (mapas o planos).