

# **EL USO DE LOS SENSORES REMOTOS EN LOS RECURSOS NATURALES**

**PRIMERA PARTE**

## **LA FOTOGRAFÍA AÉREA Y LA FOTOINTERPRETACIÓN**

**Miguel Á. Menéndez y Virgilio Núñez**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SALTA**



**INSTITUTO DE RECURSOS NATURALES Y ECODESARROLLO**

**CÁTEDRA DE SENSORES REMOTOS**

**AÑO 2009**

## Agradecimientos

A nuestras respectivas familias por el apoyo incondicional.

Al Ing. Pablo Alejandro Campos y al Sr. Facundo Castillo Mercado por su colaboración en la realización de diferentes ilustraciones.

**Palabras claves:** percepción remota, sensores remotos, fotografía aérea, aerofotogrametría, fotogrametría elemental, fotointerpretación, características espectrales, recursos naturales.

### Resumen:

La cátedra de Sensores Remotos desarrolló la presente edición con el objetivo de brindar un material de consulta básica y una guía didáctica de estudio para los alumnos de la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. El presente material de estudio es el resultado de años de docencia e investigación en las temáticas vinculadas a la utilización de las técnicas de percepción remota en la evaluación de los recursos naturales.

La primera parte del libro “El uso de los sensores remotos en los recursos naturales” trata específicamente sobre la fotografía aérea, la fotogrametría y la fotointerpretación. A modo de introducción se presentan los fundamentos básicos de la percepción remota y la utilización de las fotografías aéreas en levantamientos forestales; luego se tratan las fuentes de la energía electromagnética, y su comportamiento, desde la perspectiva de la percepción remota. A continuación, se desarrollan en detalle todos los aspectos asociados a las fotografías aéreas: las técnicas y aeronaves usadas en los vuelos fotográficos, el tipo y características de los sensores utilizados – tanto analógicos como digitales – y el procesamiento final del material obtenido para su uso en fotointerpretación. El siguiente tema ofrece al lector los principios básicos de la fotogrametría, que permiten conocer las características geométricas de las fotografías aéreas, las deformaciones que las afectan, las técnicas e instrumentos utilizados para la visión estereoscópica (en tres dimensiones) y para la obtención de medidas correctas de los objetos fotografiados. En la interpretación visual se exponen las características y las fases de la fotointerpretación, los factores que determinan el reconocimiento de un objeto, el proceso involucrado y las aplicaciones. Finalmente se tratan las características espectrales de los recursos naturales y de algunas coberturas urbanas o rurales.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Fundamentos de la percepción remota .....	11
1.2. Breve reseña histórica del uso de las fotografías aéreas en levantamientos forestales.....	11
2. ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA .....	13
2.1. Fuentes de Energía Electromagnética.....	13
2.2. Radiación Electromagnética .....	14
2.3. El Espectro Electromagnético .....	15
2.4. Efectos Atmosféricos.....	17
2.4.1. Rayleigh o dispersión de pequeñas partículas .....	18
2.4.2. Dispersión Mie .....	19
2.4.3. Dispersión no selectiva.....	19
3. ENERGÍA ELECTRO MAGNÉTICA Y PERCEPCIÓN REMOTA.....	20
3.1. Proceso de Formación de Imágenes .....	20
3.1.1. Términos y unidades de medida.....	21
4. FOTOGRAFÍAS AÉREAS .....	23
4.1. Obtención de Fotografías Aéreas.....	23
4.1.1. Planeación de vuelos.....	23
4.1.2. Vehículos para misiones fotográficas.....	25
4.1.2.1. Aviones.....	25
4.1.2.1.1. Elementos a considerar para la elección del avión .....	25
4.1.2.1.2. Aviones más comunes .....	26
4.1.2.2. Helicópteros .....	26
4.1.2.3. Satélites Artificiales .....	26
4.1.3. Geometría de los Vuelos Fotográficos.....	27
4.1.4. Consideraciones especiales para los vuelos fotogramétricos.....	28
4.1.4.1. Planeación de vuelos a distintas alturas.....	28
4.1.4.2. Planeación de vuelos con diferentes direcciones.....	29
4.1.4.3. Planeación de vuelos en zonas montañosas .....	29
4.1.4.4. Planeación de vuelos con incremento de la superposición .....	30
4.1.4.5. Efectos de los movimientos de rotación de la cámara.....	30
4.1.4.5.1. Rotación de la cámara alrededor del eje X.....	31
4.1.4.5.2. Rotación sobre el eje Y .....	31
4.1.4.5.3. Rotación sobre el eje Z.....	31
4.1.5. Poder de resolución .....	33
4.1.6. Evaluación del vuelo fotográfico.....	34
4.1.6.1. Aspectos geométricos .....	34
4.1.6.2. Revelado y copiado.....	35
4.1.6.3. Fallas en los equipos auxiliares.....	35
4.1.6.4. Causas varias .....	35
4.1.7. Fotografías aéreas verticales e inclinadas.....	35
4.1.7.1. Fotografías Verticales .....	35
4.1.7.2. Fotografías Inclinadas.....	35
4.1.7.3. Horizontales .....	35
4.1.8. Cámaras fotogramétricas convencionales.....	37
4.1.8.1. Componentes de una cámara aérea fotogramétrica .....	37
4.1.8.1.1. Almacén.....	37
4.1.8.1.2. Cuerpo .....	38
4.1.8.1.3. Cono.....	38
Obturador.....	39
Diafragma .....	40
Filtros .....	42
Sistema de suspensión.....	43
Anteojo de navegación.....	44

Caja de control o intervalómetro .....	44
Equipo auxiliar de navegación.....	45
4.1.8.2. Clasificación de las Cámaras Aéreas Convencionales .....	46
4.1.8.2.1. En función de su tipo o formato.....	46
Con formato.....	46
Sin formato .....	46
4.1.8.2.2. En función del uso .....	47
Cámaras de Reconocimiento.....	47
Cámaras Métricas.....	48
Cámaras Especiales.....	48
4.1.8.2.3. En función del material fotográfico.....	48
4.1.8.2.4. En función del número de objetivos.....	48
De un objetivo .....	48
De varios objetivos (multilente) .....	48
4.1.8.3. La formación de la imagen con cámaras analógicas .....	49
4.1.8.3.1. Sensibilidad cromática - Tipos de Emulsiones.....	49
4.1.8.3.2. Velocidad de una emulsión .....	50
4.1.8.3.3. El proceso fotográfico.....	50
Base .....	50
Emulsión fotográfica.....	51
Imagen latente.....	52
Procesos de laboratorio.....	53
Revelado.....	53
Fijado.....	54
Lavado .....	55
Equipo fotográfico de laboratorio.....	55
Aparato revelador para películas aéreas .....	55
Aparato secador de películas aéreas .....	56
Copiadora de contacto.....	56
Equipo de procesado rápido.....	57
Pupitre de exploración.....	58
4.1.9. Cámaras Fotográficas Digitales.....	58
4.1.9.1. Fotografía Digital .....	59
4.1.9.2. Funcionamiento de una Cámara Digital .....	61
4.1.9.3. Resolución de la Imagen Fotográfica .....	61
4.1.9.4. Métodos para Capturar las Imágenes.....	62
4.1.10. Tipos de Cámaras Aéreas Digitales .....	63
4.1.10.1. Principios de las cámaras digitales de barrido por línea.....	64
4.1.10.1.1. La cámara ADS 40 de LEICA .....	64
Características de la cámara ADS .....	64
El registro por barrido simultáneo.....	65
4.1.10.2. Principios de las cámaras digitales matriciales.....	67
4.1.10.2.1. La Vexcel Ultracam de Inpho.....	67
Características y funcionamiento de la Ultracam.....	67
4.1.10.2.2. La DMC de Zeiss / Intergraph Imaging .....	69
Características de la DMC .....	69
El centro de control del sistema.....	70
Las unidades de almacenamiento masivo de datos en vuelo .....	71
La interfase para navegación.....	72
Procesado geométrico y generación de la imagen final.....	72
4.1.10.3. Elección de la cámara digital más adecuada.....	73
4.1.10.4. Comparación entre cámaras digitales y analógicas .....	74
5. FOTOGRAMETRÍA ELEMENTAL .....	75
5.1. Geometría de las fotografías aéreas.....	75
5.1.1. Proyección central y ortogonal, comparación entre mapas y fotografías aéreas.....	75
5.1.2. Elementos de una fotografía aérea .....	76

5.1.3.	Escala.....	76
5.1.4.	Desplazamiento debido al relieve.....	77
5.1.4.1.	Propiedades del desplazamiento debido al relieve .....	79
5.1.5.	Desplazamiento debido a la inclinación de la fotografía .....	79
5.1.6.	Estereoscopia.....	80
5.1.6.1.	Mecanismos de la visión.....	80
5.1.6.2.	Visión monocular y binocular. La visión estereoscópica artificial .....	80
5.1.6.2.1.	Acomodación.....	81
5.1.6.2.2.	Convergencia .....	81
5.1.6.3.	Observación binocular de fotografías estereoscópicas.....	81
5.1.6.3.1.	Con ejes cruzados .....	81
5.1.6.3.2.	Con ejes convergentes.....	81
5.1.6.3.3.	Con ejes paralelos .....	82
5.1.6.3.4.	Estereoscopios de Visión Directa .....	82
	Estereoscopios de Bolsillo.....	82
	Estereoscopios de espejos.....	82
	Estereoscopios de visión simultánea .....	83
	Estereoscopios de observación simultánea de dos fajas de fotografías.....	84
	Estereoscopios para observación de fotos a distinta escala .....	84
	Interpretoscopio.....	85
5.1.6.3.5.	Otros sistemas de observación.....	86
	Anaglifo.....	86
	Luz intermitente.....	86
	Observación estereoscópica sin instrumental .....	86
5.1.6.3.6.	Exageración estereoscópica .....	86
5.1.7.	Paralaje .....	88
5.1.7.1.	Principio de la marca flotante.....	88
5.1.7.2.	Paralaje absoluta o estereoscópica .....	89
5.1.7.2.1.	Paralaje estereoscópica para un punto principal .....	91
5.1.7.2.2.	Base en el aire .....	92
5.1.7.2.3.	Fórmula de paralaje.....	92
6.	INTERPRETACIÓN VISUAL DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS .....	95
6.1.	Principios y técnicas de la fotointerpretación .....	95
6.1.1.	Definición.....	95
6.1.2.	Características.....	95
6.1.3.	Fases de la fotointerpretación.....	95
6.1.3.1.	Detección.....	96
6.1.3.2.	Reconocimiento e Identificación .....	96
6.1.3.3.	Análisis .....	96
6.1.3.4.	Deducción.....	96
6.1.3.5.	Clasificación.....	96
6.1.3.6.	Idealización .....	96
6.1.3.7.	Niveles de Referencia.....	96
6.1.3.7.1.	Nivel de Referencia General.....	96
6.1.3.7.2.	Nivel de Referencia Específico .....	97
6.1.3.7.3.	Nivel de Referencia Local.....	97
6.2.	Factores que determinan el reconocimiento de un objeto .....	97
6.2.1.	De los objetos en sí mismos .....	97
6.2.1.1.	Densidad o grado.....	97
6.2.1.2.	Forma y tamaño.....	98
6.2.1.3.	Patrón .....	98
6.2.1.4.	Regularidad e irregularidad.....	98
6.2.1.5.	Sitio o posición geográfica y asociación.....	98
6.2.2.	De su representación en un par estereoscópico.....	98
6.2.2.1.	Distinción (contraste).....	98
6.2.2.2.	Sombras .....	98

6.2.2.3.	Tono y color .....	99
6.2.2.4.	Textura .....	99
6.2.3.	De la calidad de las fotografías.....	99
6.2.3.1.	Cámara (objetivos, filtros, sistema de suspensión) .....	99
6.2.3.2.	Materiales fotográficos .....	99
6.2.3.3.	Condiciones de toma y procesamiento fotográfico.....	99
6.2.3.4.	Movimiento del avión o de los objetos fotografiados .....	99
6.2.4.	De la capacidad del intérprete .....	100
6.2.4.1.	Aptitud psicológica: imaginación, paciencia y metodología.....	100
6.2.4.2.	Aptitud individual: fisiología de los ojos, defectos de la visión.....	100
6.2.4.3.	Nivel de referencia de los objetos en estudio .....	100
6.2.4.4.	Entrenamiento en fotointerpretación.....	100
6.3.	Proceso de la fotointerpretación.....	100
6.4.	Aplicaciones de la fotointerpretación .....	100
6.5.	Interpretación de áreas boscosas en zonas templadas.....	101
6.5.1.	Reconocimiento general .....	102
6.5.2.	Fotoanálisis y mapa preliminar .....	102
6.5.3.	Chequeo a campo .....	103
6.5.4.	Mapa final e informe .....	103
6.6.	Interpretación de áreas boscosas en zonas tropicales.....	103
6.7.	Patrones de referencia usados en fotointerpretación .....	105
7.	CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LOS RECURSOS NATURALES.....	107
7.1.	Características espectrales de la vegetación .....	107
7.1.1.	Iluminación.....	107
7.1.2.	Reflexión.....	108
7.1.3.	Respuesta espectral de la vegetación.....	110
7.1.3.1.	Pigmentación de las hojas .....	111
7.1.3.2.	Estructura interna de la hoja.....	113
7.1.3.3.	Estado de maduración de la hoja.....	113
7.1.3.4.	Contenido de humedad de la hoja .....	113
7.2.	Características espectrales de los suelos.....	115
7.2.1.	Textura del suelo: tamaño de las partículas y retención de la humedad .....	115
7.2.2.	Materia orgánica y óxido de hierro .....	117
7.2.3.	Temperatura del suelo.....	118
7.2.4.	Estructura y aspereza de la superficie de suelo .....	119
7.2.5.	Efecto de la salinidad en los suelos.....	120
7.3.	Características espectrales del agua y la nieve.....	120
7.3.1.	Concentración de clorofila en agua .....	123
7.4.	Reflectancia espectral de algunas coberturas urbanas y rurales .....	124
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	125
8.1.	Material impreso: .....	125
8.2.	Páginas de Internet:.....	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Espectro solar (U.V, visible e IR cercano). .....	14
Figura 2.2. Propagación ondulatoria de la energía electro magnética. Fuente: Malacara, 1.997. ....	15
Figura 2.3. El espectro electromagnético. ....	16
Figura 2.4. Curvas de radiación. ....	17
Figura 2.5. Dispersión Rayleigh. ....	19
Figura 3.1. Esquema del proceso de percepción remota. ....	20
Figura 3.2. Radiancia de una superficie. Modificado de: Pinilla, 1995. ....	21
Figura 4.1. Área neta ganada por cada fotografía teniendo en cuenta ambas superposiciones. ....	25
Figura 4.2. Aviones para misiones fotográficas. ....	25
Figura 4.3. Representación gráfica de un vuelo fotogramétrico; superposición longitudinal del 60%. ....	27
Figura 4.4. Esquema de un vuelo con las dos superposiciones. Tomado de: Folleto Cámaras Zeiss. ....	27
Figura 4.5. Línea de vuelo normal (sin desviaciones). El área en verde representa la superficie ganada en cada toma fotográfica. ....	28
Figura 4.6. Drift ó desviación horizontal producida por la deriva. ....	28
Figura 4.7. CRAB ó desviación angular. El avión rota sobre el eje z. ....	28
Figura 4.8. Vuelos a diferentes alturas. ....	29
Figura 4.9. Dirección de vuelos según las crestas. ....	29
Figura 4.10. Dirección de vuelo atravesando las crestas. ....	30
Figura 4.11. Vuelo a lo largo de las cadenas montañosas. ....	30
Figura 4.12. Rotación sobre el eje x. ....	31
Figura 4.13. Rotación sobre el eje Y. ....	31
Figura 4.14. Rotación sobre el eje z. ....	32
Figura 4.15. Ángulo de deriva. ....	32
Figura 4.16. Deformaciones de la imagen y variaciones de la escala en fotografías tomadas con diferentes inclinaciones de la cámara. ....	33
Figura 4.17. Distorsión radial y tangencial. ....	34
Figura 4.18. Forma del área fotografiada. A: oblicua alta (con horizonte). B: oblicua baja, C: vertical. ....	36
Figura 4.19. Esquema de una cámara fotogramétrica. ....	37
Figura 4.20. Placa cribada del plano focal para adherir el negativo. ....	38
Figura 4.21. Obturador de cortina. Fuente: Barros y Bravo, 2.001. ....	39
Figura 4.22. Obturador de hojas. Fuente: Barros y Bravo, 2.001. ....	40
Figura 4.23. Obturador de discos giratorios ó central. ....	40
Figura 4.24. Diafragma tipo iris. Tomado de: Boudaud y Renaud, 2.008. ....	40
Figura 4.25. Escala estándar de números f crecientes en incrementos de un paso. Tomado de: Enciclopedia Wikipedia, 2009. ....	41
Figura 4.26. Absorción del filtro amarillo (azul negativo). ....	42
Figura 4.27. Filtro Anti-vigneting. ....	43
Figura 4.28. Conjunto de componentes de una cámara WILD. Fuente: folleto de promoción. ....	43
Figura 4.29. Cámaras Leica RC 30 en tandem con anteojo de navegación. Fuente: folleto de promoción. ....	43
Figura 4.30. Sistema de suspensión. Tomado de Deagostini Routin, 1971. ....	44
Figura 4.31. Anteojo de navegación Wild NF1 y retícula. Tomado de Deagostini Routin, 1971. ....	44
Figura 4.32. Caja de control o intervalómetro de la cámara Wild RC10. Tomado de Deagostini Routin, 1971. ....	45
Figura 4.33. Cámara de horizonte y ejemplo de un registro. ....	45
Figura 4.34. Visores o anteojos de navegación: a) cámara Zeiss con “escala” que regula los recubrimientos longitudinales, b) cámara Wild con “recuadro”. Tomado de: Deagostini Routin, 1971. ....	45
Figura 4.35. Cámaras según el campo angular del objetivo. ....	46
Figura 4.36. Esquema de cámaras panorámicas. ....	47
Figura 4.37. Principio de las cámaras continuas. ....	47

Figura 4.38. Cámaras multiespectrales. Distribución de las lentes en el cono y de las imágenes en la película fotográfica.....48

Figura 4.39. Espectrograma y tipo de emulsiones. ....49

Figura 4.40. a, Sistema cúbico de cristalización del BrAg; b, Formas y tamaños de los haluros de plata. ....51

Figura 4.41. Sistema de revelado: tanques para revelado, fijado y lavado. Porta bobinas a motor y manual. Tomado de: Folleto ZEISS.....55

Figura 4.42. Secadora de películas. Tomado de: Folleto ZEISS-JENA.....56

Figura 4.43. Copiadora de contacto. Tomado de: Folleto ZEISS-JENA.....56

Figura 4.44. a, Máquina automática LogEtronic C-24; b, Copiadora continua para película blanco y negro con compensación electrónica de tonos. Tomado de: Folletos LogEtronic.....57

Figura 4.45. a, Imagen sin compensación electrónica de tonos; b, Imagen compensada. Tomado de: Folletos Zeiss Jena.....58

Figura 4.46. Pupitre de exploración.....58

Figura 4.47. Filtro de Bayer utilizado en numerosas cámaras digitales.....59

Figura 4.48. Sensor CCD. Tomado de: Enciclopedia Wikipedia.  
[http://es.wikipedia.org/wiki/CCD\\_\(sensor\)](http://es.wikipedia.org/wiki/CCD_(sensor)).....60

Figura 4.49. Sensor de imagen Sony, CMOS. Tomado de: <http://www.neoteo.com/ccd-vs-cmos.neo>...60

Figura 4.50. Versión simplificada en 3D de un sensor CCD. Tomado de: Enciclopedia Wikipedia.....61

Figura 4.51. Influencia del tamaño del detector.....62

Figura 4.52. CCD: a, lineal y b, matricial bidimensional. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....63

Figura 4.53. Sensor ADS 40 de LEICA. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....64

Figura 4.54. a: Configuración del sensor CCD; b: Disposición del CCD en el plano focal. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....64

Figura 4.55. Disposición geométrica de las dos filas de fotodetectores en cada uno de los sensores pancromáticos. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....65

Figura 4.56. Tres direcciones de barrido en una misma posición de registro. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....65

Figura 4.57. Obtención de imágenes estereoscópicas. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....66

Figura 4.58. Comparación entre cámara digital de línea y cámara analógica. Modificado de: Mapping Interactivo. 2006.....66

Figura 4.59. Registro instantáneo en diferentes canales radiométricos. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....67

Figura 4.60. Cámara fotogramétrica digital matricial Vexcel Ultracam. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....68

Figura 4.61. Secuencia del registro de las imágenes parciales. Modificado de: Mapping Interactivo. 2006.....68

Figura 4.62. Imagen final con las áreas de solapamiento. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....69

Figura 4.63. La DMC y su ubicación relativa en la aeronave. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....69

Figura 4.64. a: Objeto movido sin compensación; b: objeto compensado. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....70

Figura 4.65. Esquema de funcionamiento del sistema FMC. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....71

Figura 4.66. Unidades FDS, su integración con la cámara y la estación de pos-proceso. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....71

Figura 4.67. Fotomosaico digital obtenido luego del levantamiento. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....72

Figura 4.68. Integración de la imagen final a partir de los datos provistos por los ocho conos. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.....73

Figura 5.1. Proyección central (a) Vs. proyección ortogonal (b). ....75

Figura 5.2. Elementos de una fotografía aérea. ....76

Figura 5.3. Parámetros de la escala de una fotografía aérea. ....77

Figura 5.4. Desplazamiento debido al relieve.....78

Figura 5.5. Desplazamiento debido a la inclinación de la fotografía. ....80

Figura 5.6. El ojo humano. Tomado de: Westland, 2001. ....80

Figura 5.7. Estereoscopios de bolsillo: a, Carl Zeiss Jena con base interpupilar fija; b, Wild TPS1 con espejos.....82

Figura 5.8. Estereoscopio de espejos Wild ST4 con barra de paralaje.....83

Figura 5.9. Estereoscopio Old Delft.....83

Figura 5.10. Esquema de la visión simultánea.....84

Figura 5.11. Estereoscopio de visión simultánea de dos fajas de fotografías.....84

Figura 5.12. Estereoscopio de observación de fotografías a distinta escala.....85

Figura 5.13. Interpretoscopio Zeiss Jena.....85

Figura 5.14. Luz intermitente.....86

Figura 5.15. Observación estereoscópica sin instrumental.....86

Figura 5.16. Factores que afectan la exageración estereoscópica.....87

Figura 5.17. Relaciones entre bases y alturas.....87

Figura 5.18. Pendiente real (q) y exagerada estereoscópicamente (p).....88

Figura 5.19. Principio de la marca flotante.....89

Figura 5.20. Paralaje absoluta o estereoscópica del punto a.....89

Figura 5.21. Diferencia de paralajes por diferencias de alturas.....90

Figura 5.22. Paralaje de un punto principal.....91

Figura 5.23. Base en el aire.....92

Figura 5.24. Esquema de la fórmula de paralaje.....94

Figura 6.1. Patrones de drenaje (Parvis, 1950).....105

Figura 6.2. Patrones de densidad de drenaje (Way, 1973).....105

Figura 6.3. Patrones de densidad de copas.....106

Figura 7.1. Luz solar y acción de los filtros fotográficos.....107

Figura 7.2. Corte esquemático de una hoja y su comportamiento a la radiación.....109

Figura 7.3. Curvas de reflexión de pasto, latifoliadas o caducifolias y coníferas (pinos y abetos).....110

Figura 7.4. Tres regiones fundamentales de respuesta espectral en relación a la reflectancia de una hoja. (Johnson, 1969).....111

Figura 7.5. Curvas de reflectancia, absorvancia y transmitancia.....112

Figura 7.6. Reflectancia espectral de la hoja de coleo.....112

Figura 7.7. Efecto del envejecimiento en la hoja de maíz.....114

Figura 7.8. Fotografía en infrarrojo color. Tomado de: Folleto Wild.....114

Figura 7.9. Reflectancia en suelos arcillosos con distinto contenido de humedad.....116

Figura 7.10. Reflectancia en suelos arenosos con distinto contenido de humedad.....116

Figura 7.11. Patrones de reflectancia de distintos tipos de suelos.....117

Figura 7.12. Relación entre reflectancia y contenido de materia orgánica.....118

Figura 7.13. Curvas de reflectancia de suelos secos y húmedos.....119

Figura 7.14. Curvas de reflectancia de los suelos con y sin costra.....120

Figura 7.15. Absorción y dispersión de agua destilada.....121

Figura 7.16. Transmitancia espectral del agua con distinto contenido de sales.....121

Figura 7.17. Reflectancia de agua limpia y turbia.....122

Figura 7.18. Desembocadura del Rhin en el lago Costanza. Fotografía infrarroja color. Folleto Wild.....122

Figura 7.19. Reflectancia espectral de nieve fresca y derretida.....123

Figura 7.20. Reflectancia espectral del agua oceánica con distinta concentración de clorofila.....123

Figura 7.21. Curvas de Reflexión de algunos elementos urbanos y rurales.....124

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Colores del espectro visible.....	17
Tabla 3.1. Unidades radiométricas comúnmente usadas en teledetección. Tomado de: Chuvieco, 2002. .....	22
Tabla 4.1. Características de las fotografías obtenidas con diferentes inclinaciones de la cámara. ....	36
Tabla 4.2. Relación entre el número $f$ y la cantidad de luz admitida. ....	41
Tabla 4.3. Relación entre las unidades estándares de sensibilidad de una emulsión fotográfica.....	50
Tabla 4.4. Componentes básicos de las cámaras convencionales y digitales. Modificado de: Mapping Interactivo. 2006.....	59
Tabla 4.5. Características técnicas de la DMC de Zeiss / Intergraph. ....	69
Tabla 4.6. Comparación entre cámaras digitales y analógicas. ....	74
Tabla 5.1. Comparación entre mapas y fotografías aéreas.....	75
Tabla 6.1. Factores que determinan el reconocimiento de un objeto. ....	97

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Fundamentos de la percepción remota

Percepción Remota: Es todo proceso cualitativo ó cuantitativo en que el aparato de medida, o más precisamente la parte sensora de éste, no está en contacto con el objeto en estudio.

De acuerdo con esta definición, para que la percepción remota sea posible se requiere que el objeto irradie algún tipo de energía. Todos los objetos con temperatura mayor al cero absoluto irradian energía electromagnética como consecuencia de su acción atómica y molecular.

Sensor Remoto: En base a los conceptos anteriores, un sensor remoto puede ser considerado un instrumento sensible, capaz de captar y evaluar objetos ubicados a distancia.

La vista, oído y olfato, las cámaras convencionales, los detectores infrarrojos, el radar, son sensores remotos. El tacto, voltímetros, dinamómetros, son sensores directos, pues requieren estar en contacto directo con el objeto.

## 1.2. Breve reseña histórica del uso de las fotografías aéreas en levantamientos forestales

A partir del invento de la fotografía (Arago, 1839) y de la resolución práctica de la misma (Niepce y Daguerre), los técnicos forestales vieron la importancia de este descubrimiento para realizar levantamientos terrestres. Es así que Laussedat (Francia, 1851-1859) crea el primer instrumento para levantamientos fotogramétricos y un método de restitución de la primera fotografía aérea tomada desde un globo.

La aplicación de los sistemas fotogramétricos en las ciencias forestales data de 1890. Principalmente empleados en Austria y Alemania donde se usaron fotografías tomadas desde las cimas de las montañas para cartografiar regiones inaccesibles en base a pares estereoscópicos.

En 1909 Wright (Italia), tomó la primera fotografía aérea desde un aeroplano y posteriormente, con el advenimiento de la primera Guerra Mundial, se produjo el desarrollo de la aviación y la aparición de las fotografías aéreas en fajas que posibilitaron la observación estereoscópica de los pares de imágenes.

Década de 1930: Pasada la Primera Guerra Mundial, fue Canadá el país que más usó las fotografías aéreas con el fin de relevar las principales áreas boscosas, debido a la creciente demanda de cartografía e información forestal. Su vecino, E.E.U.U. sólo produjo en ese tiempo algunas publicaciones sobre las posibilidades de las aerofotografías.

Por su parte en Europa, Alemania, si bien no realizaba en esos momentos trabajos de aplicación práctica de las fotografías aéreas, fue líder en los aspectos teóricos de la fotogrametría. Hegershoff, autor alemán de renombre mundial fue el inventor del Stereoplanigraph, instrumento éste para medir parámetros dasométricos en las fotografías aéreas.

El Servicio Forestal de Bavaria, realizó fotomapas como sustitutos de mapas forestales, que no fueron aceptados en la práctica por los problemas de variación de escala en las imágenes de las zonas montañosas.

Aparte de los ya nombrados países de Europa y de Suecia, que pronto aplicó los sistemas de fotointerpretación canadienses, en el resto de los países de este continente el uso de las fotografías aéreas en dasonomía fue muy pobre.

Década de 1930 -1940: Algunos países tropicales decidieron usar también las bondades de la aerofotogrametría. El Servicio Forestal de Birmania realizó el reconocimiento de la vegetación, mientras que el norte de Rhodesia preparó mapas topográficos, de suelo y vegetación en base a fotos aéreas.

El ejemplo de los resultados obtenidos por los canadienses con aerofotografía, estimuló a los técnicos forestales estadounidenses, que en 1933 realizaron trabajos prácticos de dasonomía en el valle de Tennessee, California y tierras bajas del río Mississippi.

La creciente demanda en el mercado de productos forestales en Canadá y E.E.U.U., demostró la importancia del uso de las fotografías aéreas para una rápida evaluación de las áreas boscosas todavía inexploradas y para una estimación de la cantidad y calidad de los productos forestales explotables.

En Europa, Suecia y Finlandia usaron la aerofotografía con métodos similares a los canadienses para realizar la identificación de los tipos forestales en áreas boscosas de zonas bajas y relativamente planas. Alemania y el resto de los países europeos no demostraron ningún progreso notable en el uso de las fotos aéreas en dasonomía para la década del cuarenta.

El Servicio Forestal Japonés reconoció la practicidad de los métodos aerofotográficos, comenzando para esta época con estudios completos de las masas forestales de las Islas Sakhalin y de Manchuria (ocupada entonces por los japoneses).

De la región tropical, sólo Indonesia a través de su Servicio Topográfico realizó el reconocimiento de sus bosques tropicales y en particular de los manglares usando aerofotografías.

De 1940 a nuestros días: Durante la Segunda Guerra Mundial los sensores remotos, de gran utilidad en la inteligencia militar, tuvieron un avance tecnológico importante, tal es el caso del mejoramiento de lentes, cámaras y el desarrollo de películas color y falso color en materiales y formatos con tonalidades de alta fidelidad y estabilidad. También se usó y desarrolló con fines bélicos el sistema de radar, muy aplicado en la actualidad para evaluar recursos naturales en regiones donde por razones meteorológicas (principalmente nubosidad) no sirven las fotografías aéreas convencionales.

Grandes superficies boscosas de Latinoamérica (Brasil, Colombia, Venezuela y Centroamérica) y en menor proporción otros países (Canadá, EE.UU., Australia, Nueva Guinea e Indonesia), fueron relevados con los sistemas de radar.

Otro de los grandes avances tecnológicos para la obtención de imágenes de la corteza terrestre es la creación de los satélites, que a partir de la década del 70 con el programa de Satélites Tecnológicos de Recursos de la Tierra (ERTS-LANDSAT), el programa francés SPOT y los satélites de alta resolución con miras nadirales y laterales que permiten la estereoscopía que abren un nuevo campo en la percepción remota con increíbles posibilidades.

## 2. ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA

### 2.1. Fuentes de Energía Electromagnética

Las hay de dos tipos:

Fuentes artificiales construidas con fines específicos, como por ejemplo la utilizada en el Radar.

Fuentes naturales, la principal el sol.

El sol es indiscutiblemente la fuente de energía más importante en la percepción remota. Se considera al sol como la estrella más cercana a la tierra y su estructura es en extremo compleja. Sus regiones interiores, que son completamente inaccesibles a la observación directa, tienen temperaturas estimadas en varias decenas de millones de grados centígrados ( $20 \times 10^6$  °K). Es allí donde tienen lugar las reacciones nucleares complejas que son la fuente de la energía solar.

La energía del sol se irradia uniformemente en todas direcciones y casi toda ella desaparece en el espacio, solamente una pequeñísima fracción de la misma es interceptada por la atmósfera terrestre. La emisión principal del sol corresponde a la capa externa llamada fotosfera que es muy similar a un cuerpo negro a 6000 °K.

El espectro solar se extiende desde  $0.3\mu$  a  $3\mu$  siendo su máximo  $0.47\mu$ .

En la Figura 2.1 se ha representado el espectro solar, donde se nota que la mayor cantidad de energía emitida está en el rango visible; también está representada la emisión producida por un cuerpo negro a la temperatura de 5900 °K, pudiendo observarse que la diferencia no es muy grande.

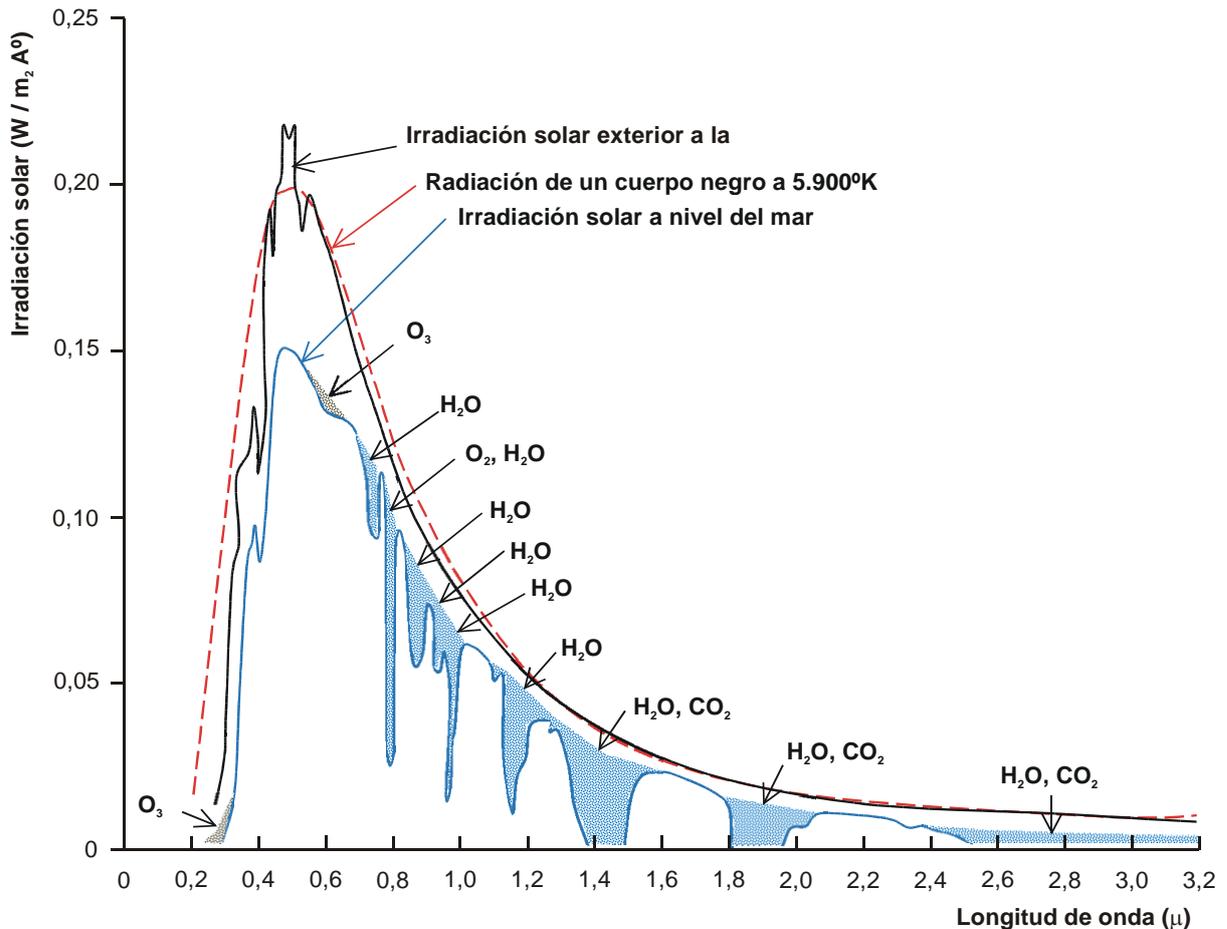


Figura 2.1. Espectro solar (U.V, visible e IR cercano).

La energía que llega a la superficie terrestre es función de:

- Hora del día;
- Época del año;
- Latitud;
- Condiciones meteorológicas;
- Difracción producida por partículas atmosféricas;
- Absorción de gases atmosféricos;
- Inclinación de la superficie receptora de energía.

## 2.2. Radiación Electromagnética

La radiación electro magnética es toda energía que se desplaza en el espacio a velocidad constante de la luz  $C^1$  y en forma armónica; las ondas son repetitivas e igualmente espaciadas en el tiempo.

La radiación electromagnética, de naturaleza intrínsecamente ondulatoria, es portadora de energía que se manifiesta sólo por su interacción con la materia. Cuando las ondas se propagan en un material, la velocidad de propagación depende de las propiedades de éste y de la frecuencia de la onda. En todos los casos la relación entre la velocidad de propagación, la longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia de onda ( $f$ ) es:

<sup>1</sup> C: Velocidad de la luz (300.000 km/seg)

$$v = f \cdot \lambda$$

Supongamos ondas viajando en la dirección x:

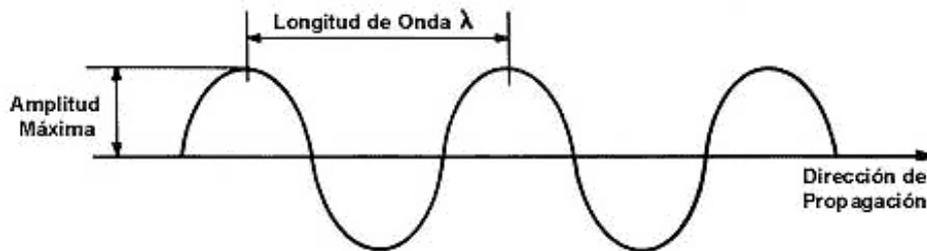


Figura 2.2. Propagación ondulatoria de la energía electro magnética. Fuente: Malacara, 1.997.

La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre dos máximos sucesivos (Figura 2.2). La onda se propaga en el vacío con una velocidad  $C$  y avanza un ciclo completo ( $\lambda$ ) en el periodo de tiempo  $T$ .

$$C = \frac{\lambda}{T} \qquad \lambda = C \cdot T$$

$T$ : período de tiempo que tarda en repetirse la onda completa;

$f$ : frecuencia; número de ondulaciones por unidad de tiempo.

La humanidad ha desarrollado los sensores remotos con el objeto de registrar diferentes anchos de banda de la radiación electromagnética para la observación y el estudio de los recursos naturales terrestres y su medio atmosférico.

### 2.3. El Espectro Electromagnético

El espectro electro magnético puede definirse como *un arreglo continuo de radiaciones, ordenado en función de la longitud de onda ó frecuencia.*

Incluye ondas que se extienden de micrones a kilómetros y no existen instrumentos o mecanismos que puedan detectar la emisión de energía a lo largo de todo el espectro, razón por la cual éste ha sido dividido en varias regiones espectrales. Por el carácter continuo del espectro, los límites tampoco son fijos y pueden variar según los autores.

Nuestros ojos, sensibles a un tipo particular de energía electromagnética, están adaptados a captar sólo la luz visible. La película fotográfica es sensible a esta energía visible y también a energía de frecuencias apenas más altas o más bajas que las de la luz visible. La energía detectada por radar, microonda e instrumentos de barrido térmico es también energía electromagnética, por lo tanto, para comprender la teledetección se debe conocer el espectro de energía electromagnética (Figura 2.3).

Un cuerpo negro teórico es el standard con el cual se compara la energía electromagnética emitida. Si un cuerpo negro tiene una temperatura de alrededor de 300°K, la curva de distribución de radiación emitida se eleva casi en 10; cuando se calienta un pedazo de hierro negro, irradia más energía porque sus interacciones moleculares se hacen más rápidas. La frecuencia de propagación aumenta, y la curva de distribución de energía se corre a la longitud de onda más corta.

Cuando la temperatura aumenta, la curva de radiación alcanza longitudes de onda más cortas del espectro visible, al principio el objeto fosforece con un color rojo apagado, a medida que aumenta la temperatura, el corrimiento espectral avanza, mientras el color cambia a anaranjado, amarillo y finalmente a blanco. Si el objeto estuviera bastante caliente,

aparecería tan brillante como el sol, que tiene una curva de temperatura de cuerpo negro de alrededor de 5900 °K.

En el ejemplo del hierro calentado (cuerpo negro), las longitudes de onda más largas aparecen de color rojo, esto ilustra el hecho de que los colores representan diferentes longitudes de onda de energía radiante. Cuando el hierro se calienta más y la frecuencia de propagación aumenta, su color cambia del rojo al amarillo, que esta compuesto no sólo de energía que vemos de color rojo, sino también de longitudes de onda más cortas de radiación electromagnética (Figura 2.4).

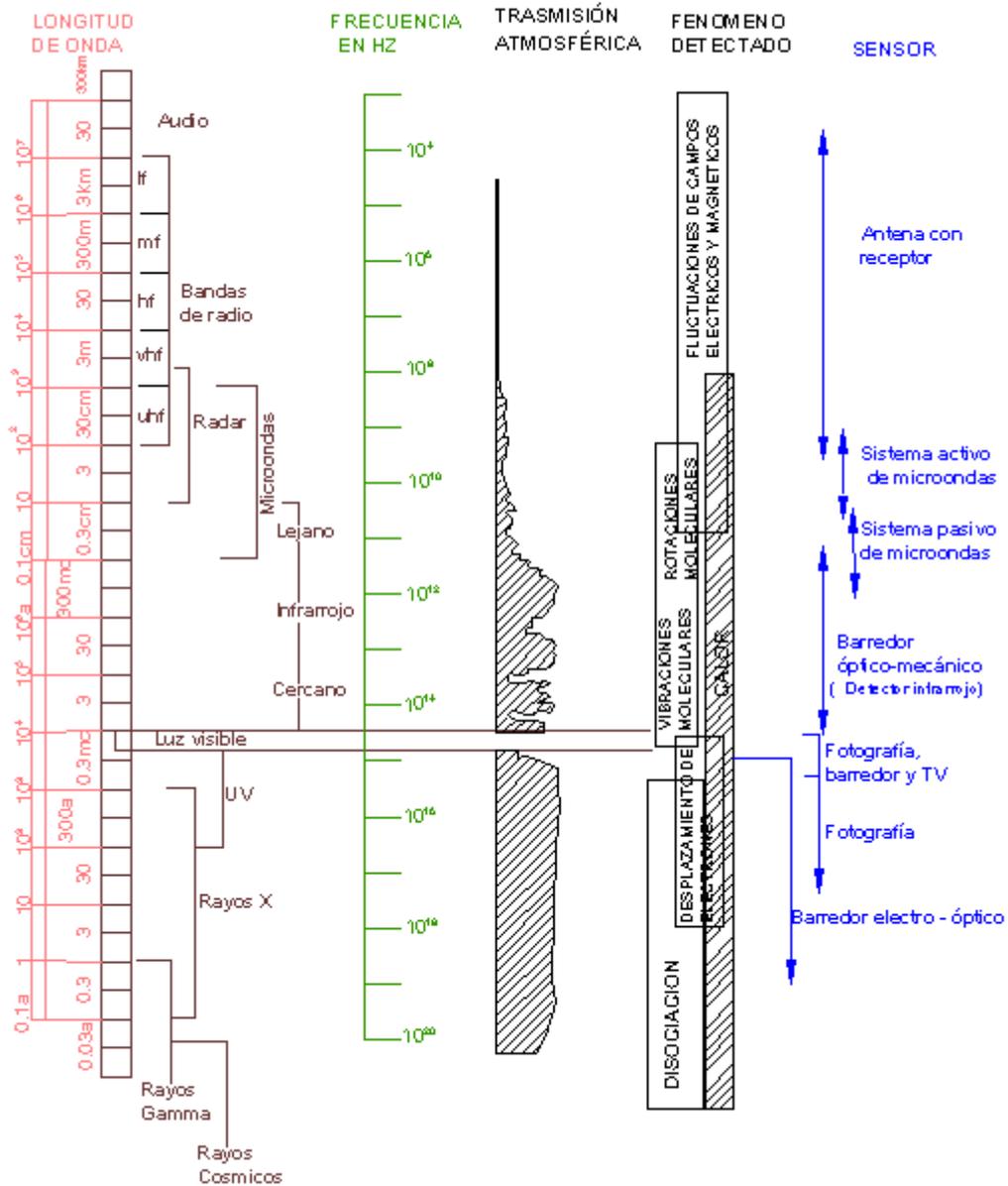


Figura 2.3. El espectro electromagnético.

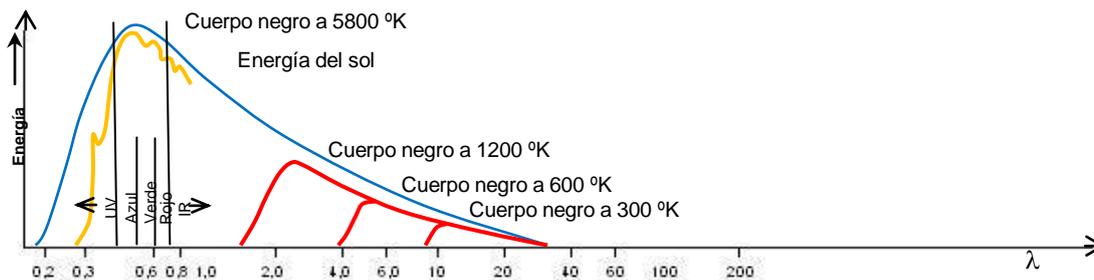


Figura 2.4. Curvas de radiación.

La luz blanca puede ser difractada en los colores ó longitudes de onda que la componen, si la hacemos atravesar un prisma. Las longitudes de onda van aproximadamente des de el 0.4 al 0.5  $\mu$  se muestran azules al ojo humano; las de 0.5 a 0.6  $\mu$  aparecen verdes y las de 0.6 a 0.7 $\mu$  las vemos de color rojo. La energía con longitudes de onda un poco menores a 0.4  $\mu$  corresponden al ultravioleta (UV) y la energía con longitudes de onda mayores a 0.7 $\mu$  se denomina infrarroja (IR).

La denominada luz visible es la que registra el ojo humano y comprende a las longitudes de onda entre los 400 y 700 m $\mu$  (milimicrones).

La luz visible ha sido dividida en rangos a los que por convención se les asignó un nombre, los límites y colores asociados se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Colores del espectro visible.

Color	$\lambda$ (m $\mu$ )
Violeta	400 - 446
Azul	446 - 500
Verde	500 - 578
Amarillo	578 - 592
Anaranjado	592 - 620
Rojo	620 - 700

El promedio de las personas puede detectar radiaciones entre 0.4 y 0.7 $\mu$ , mientras que la película fotográfica responde a longitudes de onda desde 0.3 a 1.2  $\mu$  porque no se ha desarrollado una emulsión fotosensible para longitudes de onda mayores de 1.2  $\mu$  y porque la atmósfera dispersa y absorbe energía que tiene longitudes de onda más cortas que 0.3  $\mu$ . Las longitudes de onda mayores de 1.2  $\mu$  deben ser detectadas por otros instrumentos que no sean cámaras fotográficas (ver Figura 2.3.).

## 2.4. Efectos Atmosféricos

Algunos materiales existentes en la atmósfera, tales como el ozono, causan una interrupción de la energía con longitud de onda de 0.3  $\mu$  y también en menor grado en la parte roja del espectro.

El oxígeno causa una fuerte absorción a  $0.76 \mu$  y la absorción infrarroja es dominada por el  $\text{CO}_2$  y el agua. Vale decir que estos elementos influyen sobre la energía absorbiéndola ó bloqueándola.

La atmósfera absorbe y dispersa energía radiante, haciendo tanto de atenuador como de fuente de energía radiante. La luz dispersada por la atmósfera ilumina el suelo y también se agrega a la energía radiante de la superficie. El efecto de la luz dispersada causa colores "lavados" y pérdida de resolución espacial en la impresión de tales imágenes.

Las **ventanas atmosféricas** es un concepto vinculado al comportamiento de la atmósfera como barrera (interferencia y dispersión) al paso de la energía electro magnética; es así que se comporta como transparente a determinadas longitudes de onda como por ejemplo a las ubicadas entre el UV e IR pasando por el visible; dichas regiones del espectro electromagnético son las que permiten emplear las técnicas de percepción remota con más éxito.

Las montañas distantes aparecen uniformes en el color azul, pero cuando son vistas desde menor distancia, se pueden discernir áreas brillantes y oscuras y una amplia variedad de colores se torna notable sobre sus laderas.

Hay tres tipos de dispersión: Rayleigh, Mie y Dispersión No Selectiva.

#### 2.4.1. Rayleigh o dispersión de pequeñas partículas

Existe cuando el tamaño de la partícula es más pequeño que la longitud de onda. La intensidad de dispersión es proporcional al cuadrado del volumen de la partícula dispersada. Para un tamaño de partícula dada se podrá establecer la relación de la siguiente manera: la intensidad de dispersión aumenta con el cuarto poder inverso de la longitud de onda (Figura 2.5.).

El azul del cielo, producido por la dispersión de la luz solar, se encuentra explicado por la ley de Rayleigh. La longitud de onda corta que corresponde al azul se encuentra más fuertemente dispersada que la longitud de onda correspondiente al rojo. La fórmula de Rayleigh es:

$$I = \lambda^{-4} (1 + \cos \theta) \text{ siendo lo mismo que } I = \frac{1 (1 + \cos. \theta)}{\lambda^4}$$

$I$  = Intensidad relativa de dispersión

$\theta$  = Ángulo de dispersión, formado por la dirección de la energía incidente y la dispersada.

El color rojo del atardecer y amanecer también se deben a la dispersión Rayleigh; a medida que el sol se aproxima al horizonte, sus rayos siguen una trayectoria más larga a través de la atmósfera. Las partículas que intervienen en este proceso son particularmente las moléculas de los gases.

Este tipo de dispersión no sólo determina los tonos "lavados" de las fotografías blanco y negro expuestas a la parte verde azul del espectro, sino también en el tinte azul general de las fotografías tomadas a elevadas altitudes sobre regiones húmedas a semihúmedas.

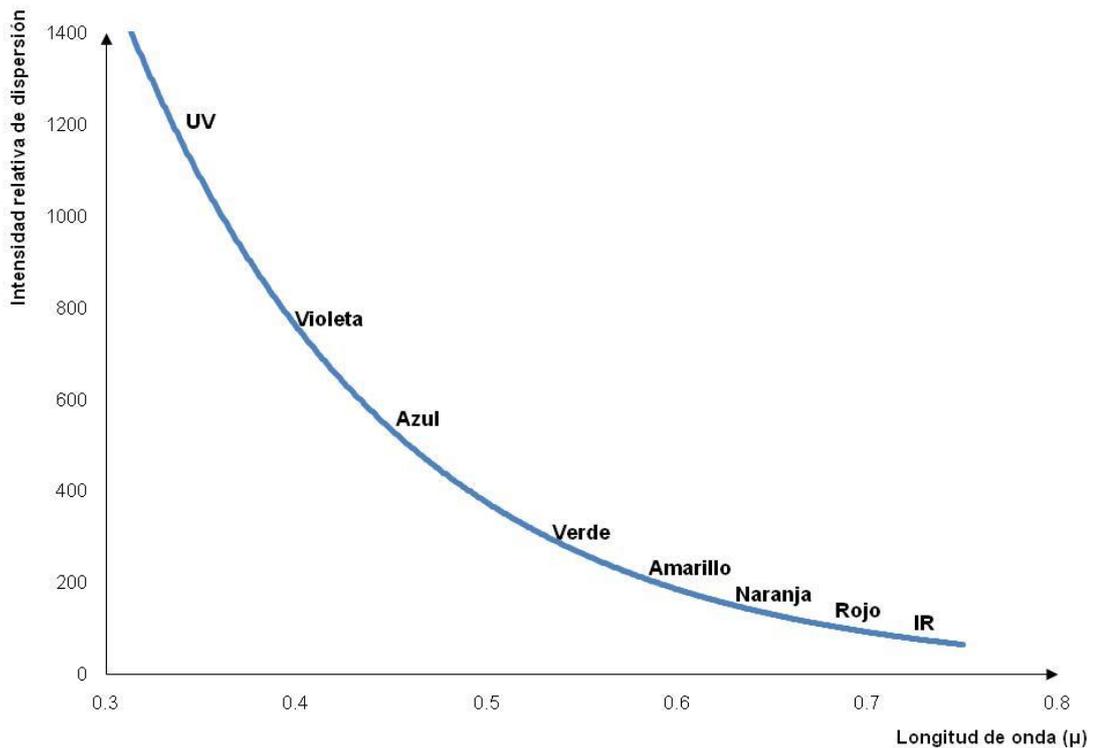


Figura 2.5. Dispersión Rayleigh.

### 2.4.2. Dispersión Mie

La teoría considera que el diámetro de la partícula es un poco mayor que la longitud de onda y se aplica a los aerosoles atmosféricos: polvo, bruma, etc. La dispersión tipo Mie produce el blanco brumoso, marrón o a veces la apariencia roja del cielo cuando la atmósfera se halla cargada de polvo, humo, smog, etc.

### 2.4.3. Dispersión no selectiva

Se produce cuando el diámetro de la partícula es muy superior a la longitud de onda, siendo en este caso la probabilidad de interacción la misma cualquiera sea la longitud de onda, así se puede explicar el blanco de las nubes. En este caso la dispersión depende solamente del diámetro de las partículas y de su densidad numérica.

### 3. ENERGÍA ELECTRO MAGNÉTICA Y PERCEPCIÓN REMOTA

#### 3.1. Proceso de Formación de Imágenes

Cuando la energía incide sobre una superficie de materia sólida, es reflejada, absorbida o transmitida. El grado de reflexión, absorción o transmisión es función de las propiedades del material y de la longitud de onda de la energía. Algunos materiales son buenos reflectores de energía en ciertas longitudes de onda y transmiten o absorben energía en otras. Este fenómeno lleva a que un objeto tenga un "color" o un "tono" determinado sobre la imagen fotográfica.

Un material que absorbe energía puede ser calentado hasta un nivel superior al de los elementos que lo rodean, causando la emisión de energía por parte del material receptor. Las variaciones con que el tono de las imágenes en infrarrojo térmico se manifiestan son por diferencias en las temperaturas radiométricas de los materiales dentro de la escena.

Los materiales con que está constituida la tierra responden de distintas formas a la energía de diversas longitudes de onda según las propiedades químicas y físicas, configuración y aspereza de la superficie, intensidad de iluminación y ángulo de incidencia.

Las diversas respuestas de los materiales de la tierra, cuando se registran en imágenes de percepción remota, toman configuraciones que proveen de medios para discriminar rasgos de la tierra. Mediante el análisis de estas configuraciones y sus interrelaciones se deduce la identidad de los materiales de la tierra. A causa de que diversos tipos de sensores remotos registran en diferentes bandas de energía y con diferente resolución, sensibilidad y distorsión, el analista debe estar al tanto del proceso de formación de imágenes a fin de evaluar la significación de las configuraciones.

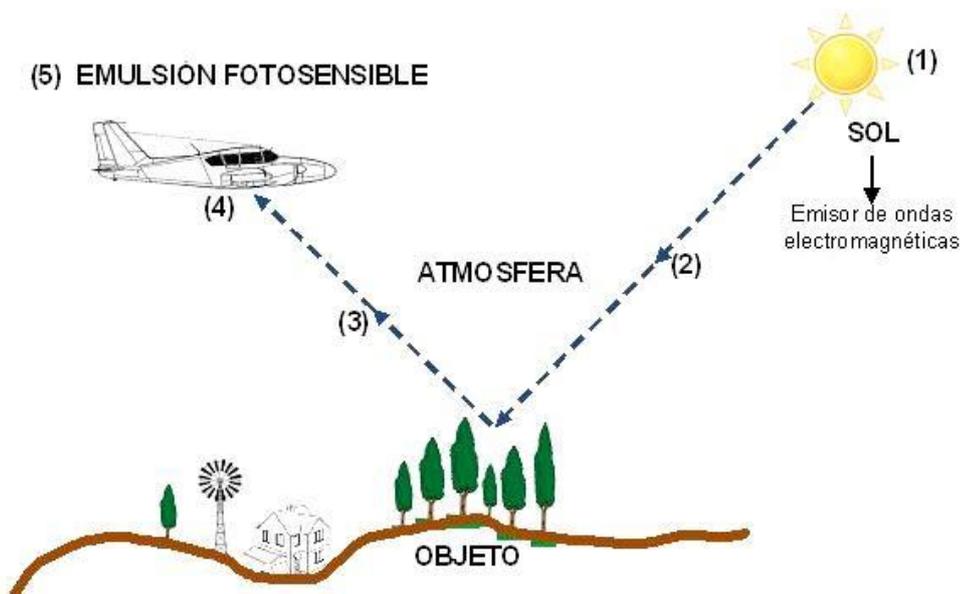


Figura 3.1. Esquema del proceso de percepción remota.

Reducido a sus elementos fundamentales, el proceso de formación de imágenes incluye (Figura 3.1.):

1. Una fuente de energía electromagnética.

2. Un medio de propagación o transmisión de energía (atmósfera).
3. La reflexión o emisión de la energía por parte del objeto.
4. La transmisión de la energía desde el objeto al sensor remoto a través del medio de propagación.
5. Registro de la energía que llega al detector y su almacenamiento ya sea en forma gráfica (emulsión fotográfica), analógica (cinta magnética) o digital (memorias).

### 3.1.1. Términos y unidades de medida

Como ya se dijera, una observación remota sucede si el objeto refleja o irradia energía y el sensor detecta dicho flujo energético. Ese flujo tiene una intensidad determinada, proveniente de, o dirigida a, una unidad de superficie y con una dirección concreta. Convendrá entonces explicitar las unidades de medida comúnmente empleadas en teledetección a efectos de ser rigurosos al presentar los procesos de adquisición.

- Energía radiante (Q). Indica el total de energía radiada en todas direcciones. Se mide en Julios (J).
- Densidad radiante (W). Total de energía radiada en todas direcciones por unidad de volumen. Se mide en Julios por metro cúbico ( $J/m^3$ ).
- Flujo radiante ( $\Phi$ ). Total de energía radiada por unidad de tiempo. Se mide en vatios (W).
- Emitancia o excitancia radiante (M). Total de energía radiada en todas direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ).

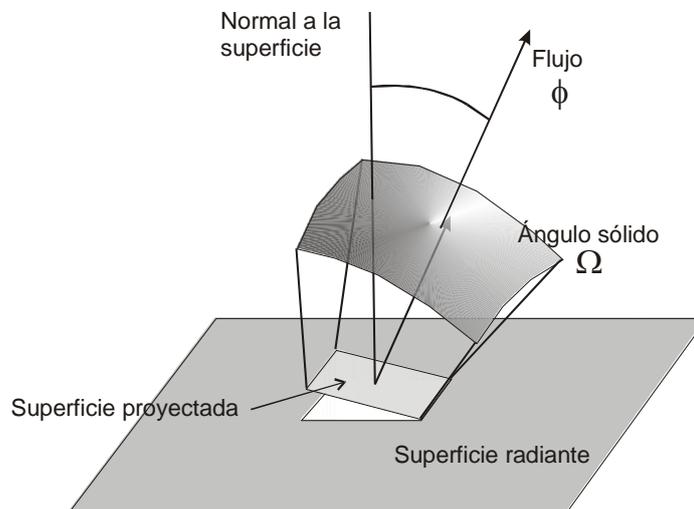


Figura 3.2. Radiancia de una superficie. Modificado de: Pinilla, 1995.

- Irradiancia radiante (E), total de energía radiada sobre unidad de área y por unidad de tiempo. Es equivalente a la emitancia, si bien esta indica la energía emitida, mientras irradiancia refiere a la incidente ( $W/m^2$ ).
- Intensidad radiante (I). Total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido ( $\Omega$ ). Se trata de un ángulo tridimensional, que se refiere a la sección completa de la energía transmitida y se mide en estereoradianes. Por lo tanto la intensidad radiante se mide en Vatios por estereoradián ( $W/sr$ ).

- Radiancia (L). Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en teledetección porque describe lo que mide el sensor. Se cuantifica en vatios por m<sup>2</sup> y estereo radián (W/ m<sup>2</sup> sr).
- Radiancia espectral (L<sub>λ</sub>). Indica total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Por cuanto el sensor detecta un intervalo particular de longitud de onda del espectro, la radiancia espectral se constituye en la medida más cercana a la observación remota. De igual forma que la radiancia, la emitancia se puede referir a una longitud de onda añadiendo el subíndice λ.
- Emisividad (ε) relación entre la emitancia de una superficie (M) y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura (M<sub>n</sub>).
- Reflectividad (ρ), relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie.
- Absortividad (α), relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie.
- Transmisividad (τ), relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

Tabla 3.1. Unidades radiométricas comúnmente usadas en teledetección. Tomado de: Chuvieco, 2002.

Concepto	Símbolo	Formula	Unidad de medida
Energía radiante	Q	-----	Julios (J)
Densidad radiante	W	DQ / Dv	J / m <sup>3</sup>
Flujo radiante	Φ	DQ / Dt	Vatios (W)
Emitancia radiante	M	DΦ / DA	W / m <sup>2</sup>
Irradiancia	E	DΦ / DA	W / m <sup>2</sup>
Intensidad radiante	I	DΦ / DΩ	W /sr
Radiancia	L	DI cos Φ / DA	W / m <sup>2</sup> . sr
Radiancia espectral	L <sub>λ</sub>	DL / Dλ	W / m <sup>2</sup> sr μm
Emisividad	ε	M / M <sub>n</sub>	
Reflectividad	ρ	Φ <sub>r</sub> / Φ <sub>i</sub>	
Absortividad	α	Φ <sub>a</sub> / Φ <sub>i</sub>	
Transmisividad	τ	Φ <sub>t</sub> / Φ <sub>i</sub>	

sr: estereo radián, medida del ángulo sólido. μm: micrón o micra (10<sup>-6</sup> metros)

M<sub>n</sub>: Emitancia de un cuerpo negro. Φ<sub>i</sub>: Flujo incidente.

Φ<sub>a</sub>: Flujo absorbido. Φ<sub>t</sub>: Flujo transmitido.

Φ : Angulo formado por la superficie y la dirección normal.

## 4. FOTOGRAFÍAS AÉREAS

### 4.1. Obtención de Fotografías Aéreas

#### 4.1.1. Planeación de vuelos

Cuando se va a comenzar un proyecto de levantamientos aerofotogramétrico, la sección planeación deberá establecer los requisitos del proyecto y proporcionará a los encargados de diseñar específicamente el vuelo la información necesaria, incluyendo extensión del área y sus límites, intervalo de tiempo en que deben tomarse las fotografías, escala, recubrimientos y demás especificaciones que permitan comenzar los cálculos.

La información recibida es completada de acuerdo con las necesidades del proyecto y con esos datos el diseñador deberá calcular y establecer el plan de vuelo y sus especificaciones para llevar a cabo la misión fotográfica con ciertas tolerancias.

Para la planeación del levantamiento fotográfico se deberá contar con información detallada sobre:

- Objetivo del levantamiento, a partir del cual se fijará la escala media;
- Características de la aeronave y de la cámara fotográfica a utilizar;
- Tipo de película y filtros requeridos según la zona y la época del año;
- Superficie, límites y características topográficas de la zona a levantar;
- Posición y altura del sol según la época del año y la hora del día para obtener tomas fotográficas adecuadas;
- Distancia y tiempo de vuelo estimado al aeroparque más próximo desde donde se operará.

El informe para la realización de la misión deberá ser presentado sobre un mapa topográfico (ó esquema de la zona) conteniendo la siguiente información:

1. Líneas de Vuelo: De este parámetro interesa definir la dirección (azimut), longitud (Li) y la ubicación con respecto a los detalles del terreno.

El número de líneas de vuelo se calcula considerando la longitud y separación entre las mismas, teniendo en cuenta además las dimensiones y forma de la zona a fotografiar.

2. Separación entre líneas de vuelo (Ai):

$$A_i = s \cdot E_i \cdot (1 - V_i)$$

s: lado de la fotografía (23 cm.); Ei: módulo escalar; Vi: recubrimiento lateral.

3. Alturas de vuelo (Z): Se deben considerar las alturas de vuelo absolutas (Zo) y relativas (Zi) para cada línea de vuelo

$$Z_i = E_i \cdot c$$

$$Z_o = Z_i + H_i$$

Ei: modulo escalar; c: distancia principal del objetivo; Hi: altitud del terreno.

4. Base en el aire (Bi): Distancia entre dos tomas fotográficas consecutivas.

$$B_i = s \cdot E_i \cdot (1 - U_i)$$

s: lado de la foto; Ei: módulo escalar; Ui: recubrimiento longitudinal.

5. Recubrimiento longitudinal (Ui) y lateral (Vi):

$$U_i = \frac{B_i}{s \cdot E_i} \quad V_i = 1 - \frac{A_i}{s \cdot E_i}$$

Bi: base en el aire; Ai: separación entre líneas de vuelo; s: lado de la fotografía; Ei: módulo escalar.

6. Intervalo entre exposiciones (I)

$$I = \frac{B_i}{GS}$$

Bi: base en el aire; GS: velocidad del avión

7. Tiempo de vuelo (T)

$$T = \frac{L}{GS}$$

L: longitud total del vuelo fotográfico; GS: velocidad del avión.

8. Movimiento de la imagen fotográfica (MIF)

$$MIF = \frac{GS \text{ (Km/h)}}{3600 \text{ (seg/h)}} \cdot t_e \text{ (seg)} \cdot \frac{1}{E_i} \cdot (10^{-6})$$

GS: Velocidad del avión; te: tiempo de exposición; Ei: módulo escalar

El Valor del MIF nunca debe superar 0.02 mm; de lo contrario, la imagen saldrá movida.

9. Número de fotografías por línea de Vuelo (Nv):

$$N_v = \frac{L_i}{B_i}$$

Li: longitud de la línea de vuelo; Bi: base en el aire.

10. Número total de fotografías (Nt):

$$N_t = \sum N_v$$

Se obtiene sumando el número de fotografías de cada línea de vuelo (Nv).

Es posible estimar a priori el número de fotografías que cubrirán el área a levantar, mediante la siguiente ecuación:

$$N_{t \text{ aproximado}} = \frac{\text{Área a fotografiar}}{s^2 \cdot E_i^2 \cdot (1 - U_i) \cdot (1 - V_i)}$$

s: lado de la fotografía; Ei.: módulo escalar; Ui: recubrimiento longitudinal; Vi: recubrimiento lateral.

11. Superficie cubierta por cada fotografía (Si<sup>2</sup>):

$$S_i^2 = (s \cdot E_i)^2$$

S: lado de la fotografía; E<sub>i</sub>: módulo escalar

12. Área neta ganada por cada fotografía (ver Figura 4.1)

$$AN = s^2 \cdot E^2 \cdot (1 - U_i) \cdot (1 - V_i)$$

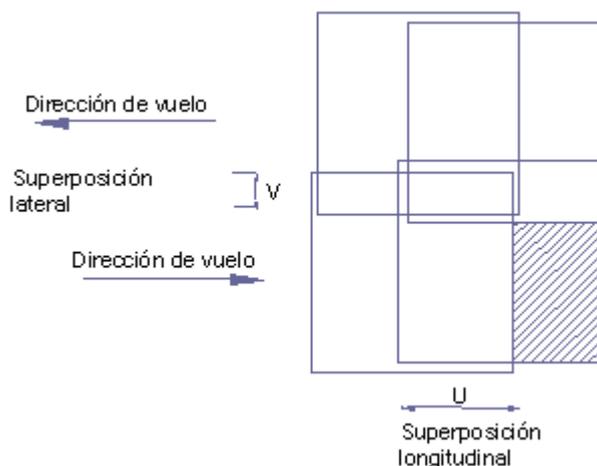


Figura 4.1. Área neta ganada por cada fotografía teniendo en cuenta ambas superposiciones.

#### 4.1.2. Vehículos para misiones fotográficas

##### 4.1.2.1. Aviones

Por lo general se utilizan aviones comerciales o militares, pocos son los transformados o contruidos especialmente para las misiones fotográficas.



Figura 4.2. Aviones para misiones fotográficas.

##### 4.1.2.1.1. Elementos a considerar para la elección del avión

1. Buena visibilidad para el navegante y piloto desde el horizonte hasta el nadir.

2. Gran variación de velocidad, para moverse rápidamente mientras no se toman fotografías y para operar con velocidad reducida mientras se toman las imágenes. Velocidad Crucero Normal: 250 Km/h.
3. Maniobrabilidad: reducir tiempo en giros, aterrizar y despegar en pistas cortas
4. Buen poder de ascensión para llegar a la altura deseada en el menor tiempo.
5. Techo alto de vuelo: el valor normal es de 8500 m. y en aviones modernos puede llegar a 10.000 m.
6. Vibraciones mínimas para evitar el movimiento de la imagen fotográfica.
7. Tubos de escape dispuestos de tal manera que se evite que los gases de la combustión manchen las ópticas.
8. Orificio para la cámara: debe ser amplio para no molestar el funcionamiento de la cámara, aun para la toma de fotografías inclinadas.
9. La cabina debe ser amplia para que entre con soltura el equipo fotográfico y para que el fotógrafo trabaje cómodamente.
10. Tripulación mínima: tres personas, piloto, navegante y fotógrafo. Los tres permanentemente comunicados.
11. Costos de mantenimiento y operación deben ser mínimos. Caso de los aviones equipados con motores a turbina (reacción y turbohélice).

#### **4.1.2.1.2. Aviones más comunes**

**Aviones comerciales:** Aero Commander, Piper Aztec Turbo, Piper Navajo, Cessna / Skynigth, Beechcraft Q. B80 y A 200 (Marina), DC 3 y el Guaraní.

**Jets:** Lear, Falcon, Cessna Citation, etc.

#### **4.1.2.2. Helicópteros**

Características:

- Baja velocidad.
- Posibilidad de permanecer en el aire en forma estable.
- Aterrizar y despegar casi en posición vertical.
- Ventajas: la base se puede establecer en la misma zona de trabajo aprovechando las condiciones meteorológicas.
- Inconvenientes: las vibraciones son considerables y distintas a las del avión, lo que dificulta enormemente la toma de fotos a baja altura con tiempos de exposición prolongados.

#### **4.1.2.3. Satélites Artificiales**

En la década de 1960-1970, USA y Rusia lanzaron satélites con cámaras fotogramétricas y de televisión para obtener imágenes de la tierra y de la luna.

Al principio se usaron órbitas ecuatoriales y luego polares, elípticas o circulares con radio de varios Km (100 a 500) obteniéndose imágenes de escala muy pequeña, pero que prestan mucha ayuda en trabajos de reconocimiento.

Entre 1972-1973 se programaron dos vuelos ERTS obteniendo cobertura cíclica de la tierra cada 18 días con órbita circular con altura de vuelo de 950 Km. La imagen cubre un campo de 185 Km por 185 Km y cada 24 horas, y tiene un recubrimiento del 14 % en latitud 0° y del 57 % en latitud 60°.

### 4.1.3. Geometría de los Vuelos Fotográficos

El avión al volar sobre el terreno obtiene sucesivas fotografías superpuestas, obtenidas por la cámara dirigida verticalmente hacia la tierra. La superficie abarcada por una de estas fotos está indicada por los rayos que emanan desde el objetivo y se extiende al terreno. Esta superposición entre dos imágenes fotográficas consecutivas es la que permitirá la visión en relieve y lograr con ello ver los objetos en tres dimensiones.

La técnica de vuelo aerofotográfico normal es:

Superposición longitudinal:  $60\% \pm 7\%$  (nunca menor al  $53\%$ )

Superposición lateral  $30\% \pm 15\%$

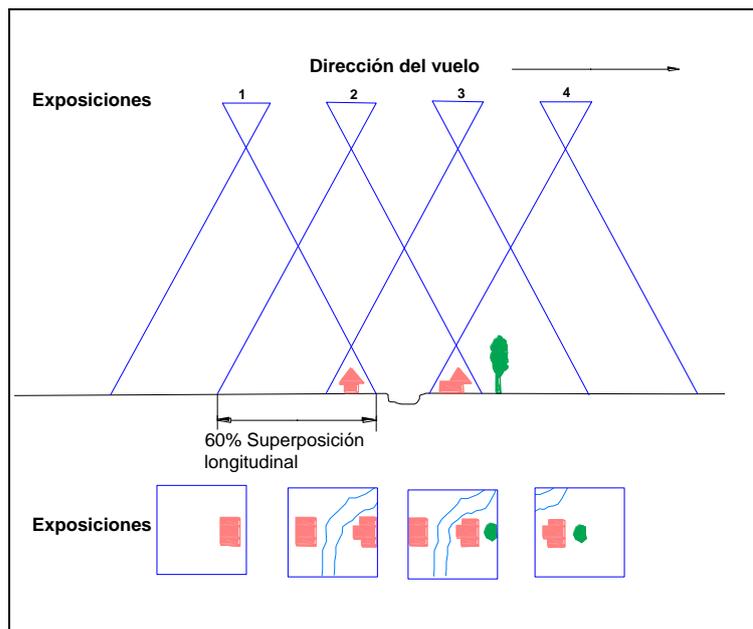


Figura 4.3. Representación gráfica de un vuelo fotogramétrico; superposición longitudinal del 60%.

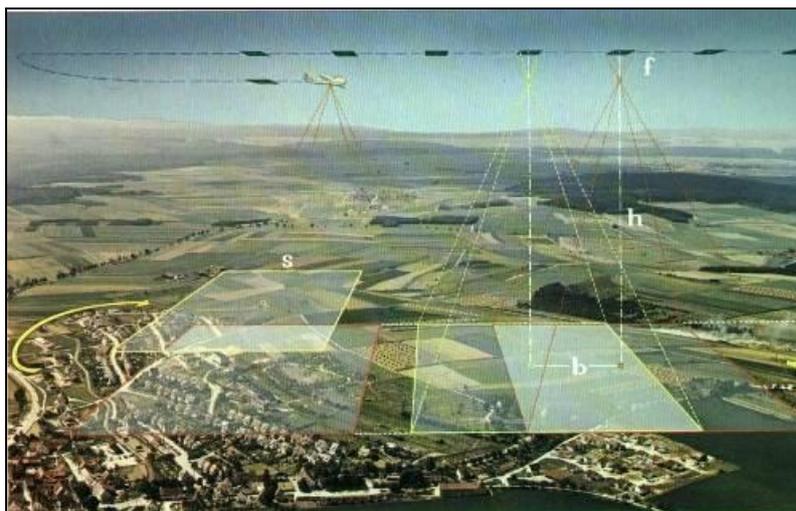


Figura 4.4. Esquema de un vuelo con las dos superposiciones. Tomado de: Folleto Cámaras Zeiss.

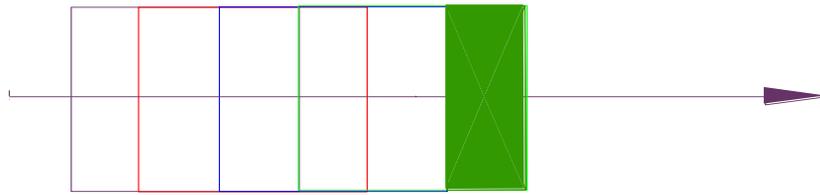


Figura 4.5. Línea de vuelo normal (sin desviaciones). El área en verde representa la superficie ganada en cada toma fotográfica.

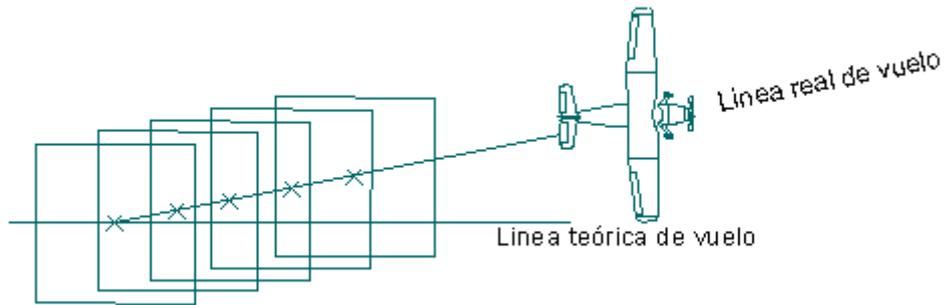


Figura 4.6. Drift ó desviación horizontal producida por la deriva.

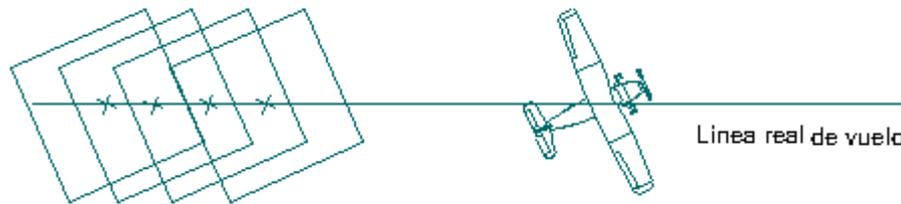


Figura 4.7. CRAB ó desviación angular. El avión rota sobre el eje z.

#### 4.1.4. Consideraciones especiales para los vuelos fotogramétricos

##### 4.1.4.1. Planeación de vuelos a distintas alturas

Cuando existen cambios topográficos se debe mantener la relación:  $Z_1 - hp_1 = Z_2 - hp_2$

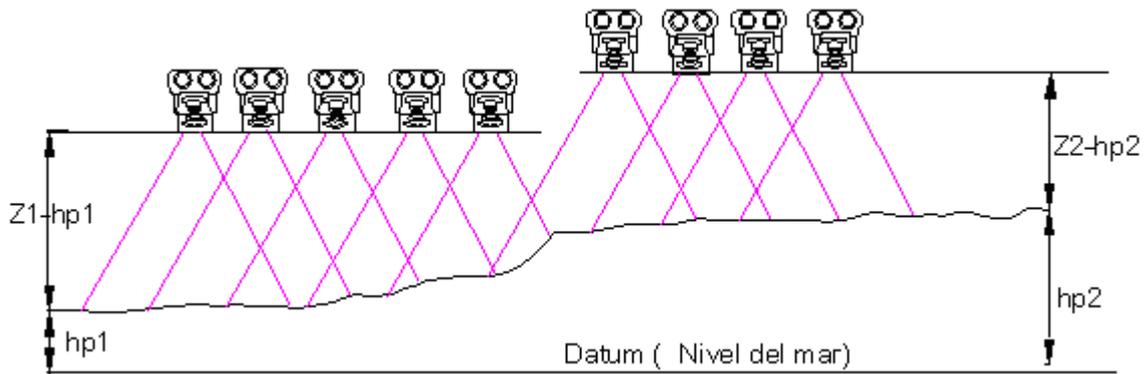


Figura 4.8. Vuelos a diferentes alturas.

#### 4.1.4.2. Planeación de vuelos con diferentes direcciones

Se realiza siempre respetando la dirección de las crestas ó líneas de divorcios de aguas.

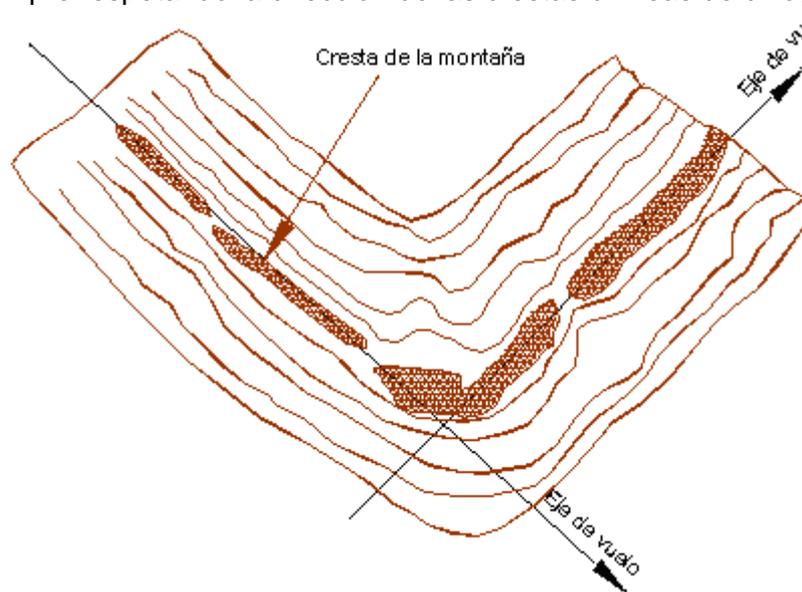


Figura 4.9. Dirección de vuelos según las crestas.

#### 4.1.4.3. Planeación de vuelos en zonas montañosas

Los levantamientos fotográficos se deben realizar siguiendo la dirección de las cadenas montañosas y no a través de éstas. Si el vuelo se realiza atravesando las cadenas montañosas, las escalas se deforman considerablemente ya que varían fuertemente las alturas de vuelo. Por otra parte, es imposible modificar permanentemente las alturas de vuelo sobre una misma ruta; aspecto que puede ser controlado si las trayectorias se realizan siguiendo los principales cambios topográficos.

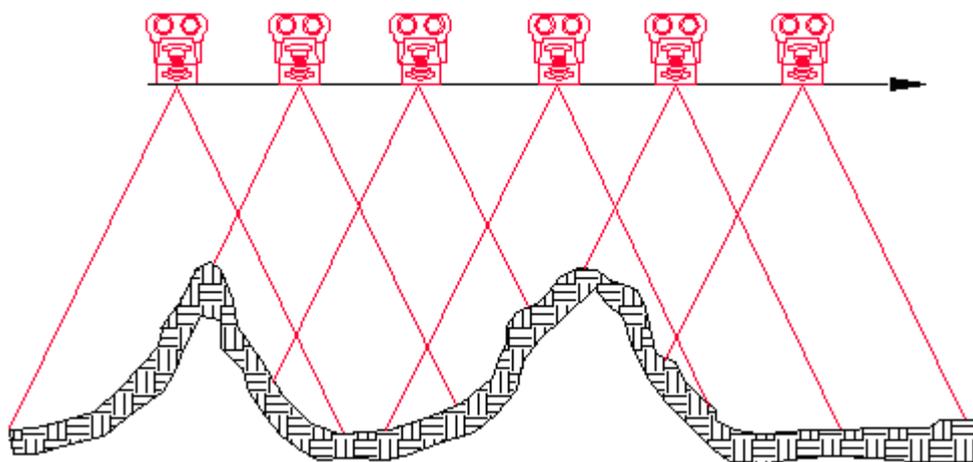


Figura 4.10. Dirección de vuelo atravesando las crestas.

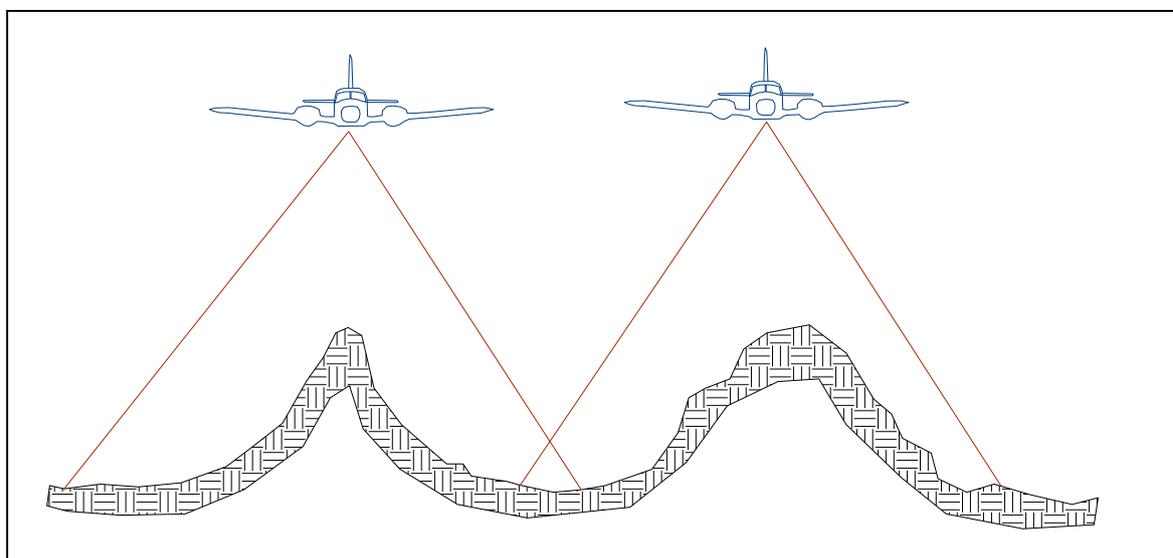


Figura 4.11. Vuelo a lo largo de las cadenas montañosas.

#### 4.1.4.4. Planeación de vuelos con incremento de la superposición

En zonas muy escarpadas se deben aumentar ambos recubrimientos, tanto longitudinal como lateral; principalmente este último. En general, si las variaciones de altura exceden un 20 % de la altura de vuelo, debe aumentarse el recubrimiento lateral para evitar vacíos en la cobertura estereoscópica.

#### 4.1.4.5. Efectos de los movimientos de rotación de la cámara

A lo largo de la línea de vuelo, se registran imágenes del terreno a intervalos constantes (base en el aire); cada uno de los disparos de la cámara represente un punto de exposición o punto de toma. La imagen obtenida en cada una de las posiciones de toma fotográfica, está afectada por los movimientos de rotación de la cámara respecto de los ejes X, Y y Z. El eje X coincide con la dirección de vuelo, el eje Y es perpendicular al X sobre el plano horizontal, mientras que el vector Z coincide con el eje óptico de la cámara.

**4.1.4.5.1. Rotación de la cámara alrededor del eje X**

La rotación alrededor del eje X recibe el nombre común de ladeo y su valor debe ser el mínimo posible para poder aceptar la fotografía como vertical (Figura 4.12.).

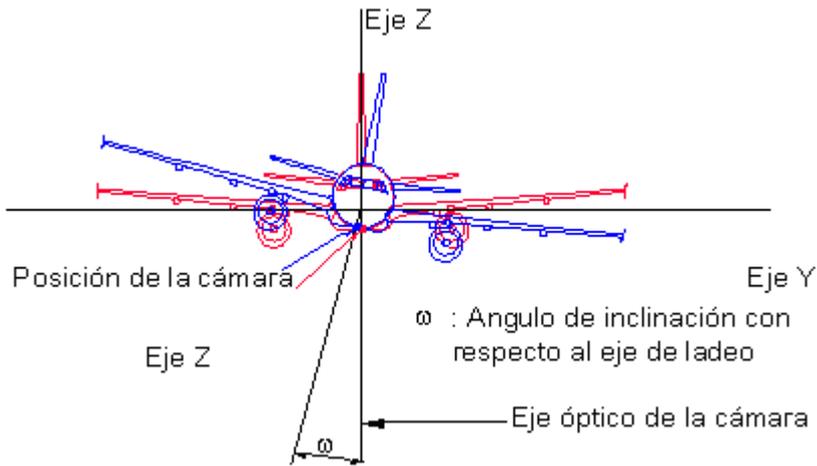


Figura 4.12. Rotación sobre el eje x.

**4.1.4.5.2. Rotación sobre el eje Y**

Es otro movimiento de inclinación de la cámara con respecto a la vertical y recibe el nombre de cabeceo (Figura 4.13.).

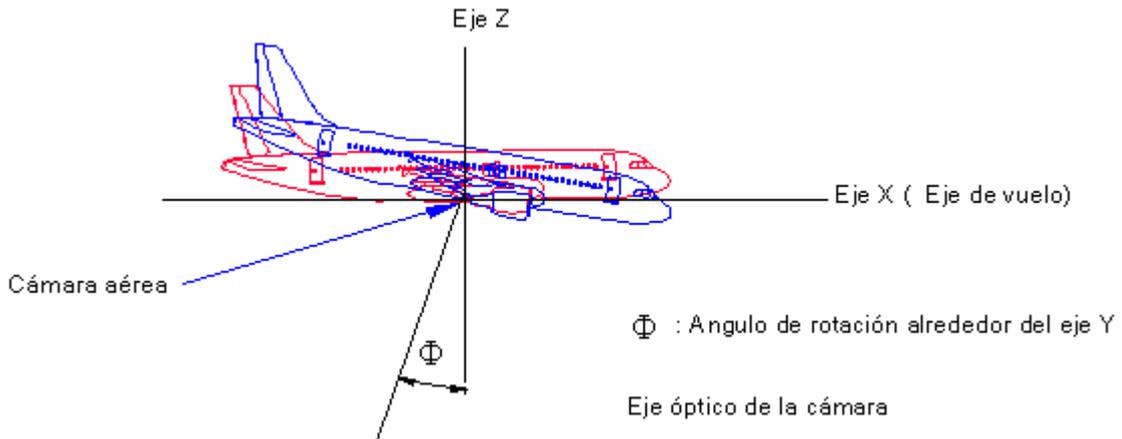


Figura 4.13. Rotación sobre el eje Y.

**4.1.4.5.3. Rotación sobre el eje Z**

Esta rotación sobre el eje Z no afecta a la verticalidad de la fotografía, sino a su posición con respecto a la línea de vuelo y se llama corrientemente ángulo de deriva (Figura 4.14.).

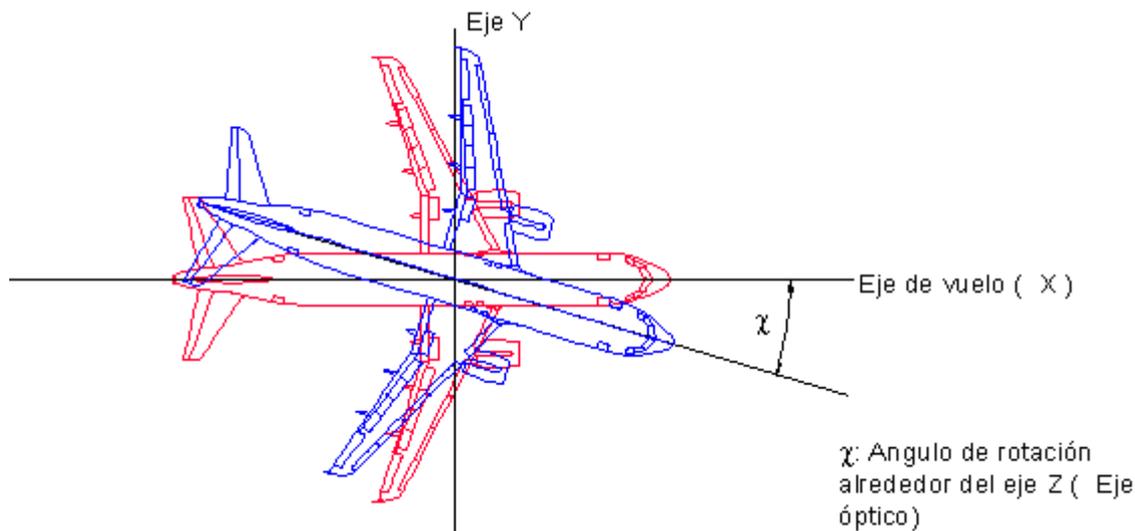


Figura 4.14. Rotación sobre el eje z.

El ladeo del avión en el momento del disparo de la cámara, afecta el recubrimiento lateral entre las fajas fotográficas; el cabeceo del avión afecta el recubrimiento longitudinal entre fotografías; la deriva, producida por el desplazamiento lateral del avión, afecta tanto el recubrimiento longitudinal como el lateral. La desviación del avión con respecto al eje de vuelo teórico, puede compensarse rotando la cámara, sin embargo esta desviación aún corregida, afecta el recubrimiento lateral entre fajas como lo muestra la Figura 4.15.

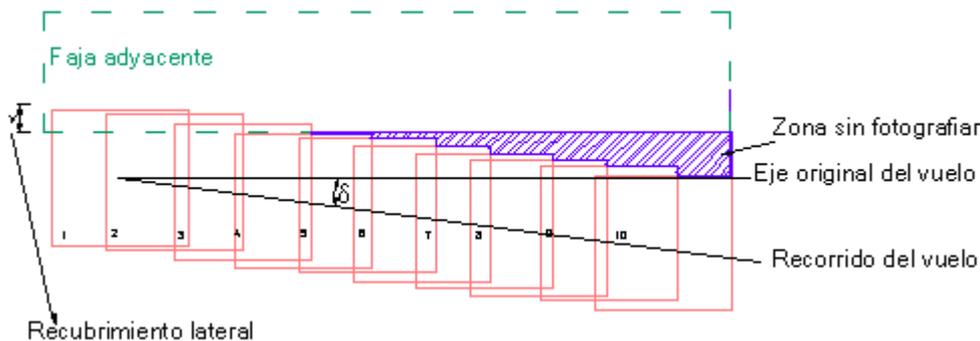


Figura 4.15. Ángulo de deriva.

Las imágenes tomadas con cabeceo y/o ladeo del avión presentan variaciones de la escala en función del grado y dirección de la inclinación del eje de la cámara, siendo esta fija.

Las líneas curvas de la Figura 4.16 muestran gráficamente las deformaciones de la imagen en las copias fotográficas. Las escalas se reducen proporcionalmente con la distancia desde la cámara y los objetos del terreno fotografiado.

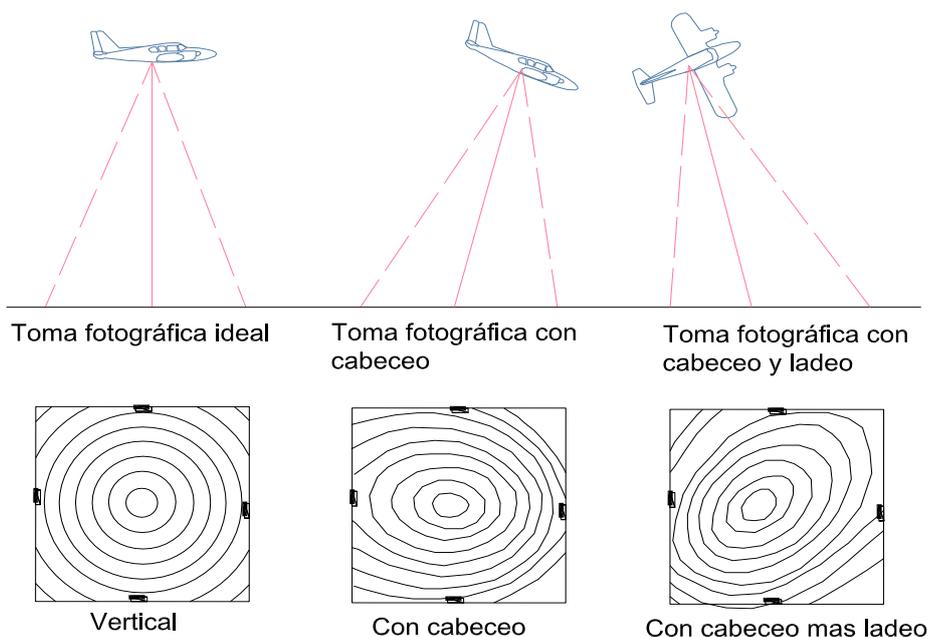


Figura 4.16. Deformaciones de la imagen y variaciones de la escala en fotografías tomadas con diferentes inclinaciones de la cámara.

#### 4.1.5. Poder de resolución

El poder de resolución (G) es la capacidad de un sistema óptico de registrar y representar los detalles y objetos próximos como elementos separados.

$$G = \frac{Z \text{ (m)} \times 100 \text{ (cm/m)}}{R \text{ (l/cm)} \times C \text{ (cm)}}$$

Donde:

G: resolución sobre el terreno en centímetros; Z: Altura de vuelo sobre el terreno en metros; R: resolución fotográfica en líneas por centímetro; C: distancia principal de la cámara en centímetros.

La ecuación presentada permite calcular la mínima separación entre dos objetos en el terreno, requerida para que los mismos aparezcan separados en la fotografía.

Por ejemplo:

Z = 1.800 m; C = 152 mm; Escala media = 1:11.840

R = 85 l/mm (Kodak Plus X Aerographic film, tipo 2401)

$$G = \frac{1800 \text{ m} \times 100 \text{ cm/m}}{850 \text{ l/cm} \times 15.2 \text{ cm}} = \frac{180\,000 \text{ cm}}{12920} = 13,9 \text{ cm}$$

En la práctica, el poder de resolución está afectado además por el contraste de la imagen, el efecto de la atmósfera y las vibraciones del avión.

#### 4.1.6. Evaluación del vuelo fotográfico

Para juzgar la calidad de las fotografías aéreas se deben evaluar sistemáticamente a los factores que afectan las condiciones ideales de un vuelo; ellos son: Aspectos geométricos; Revelado y copiado; Fallas en los equipos auxiliares; y, Causas varias como fallas humanas, condiciones climáticas adversas, etc.

##### 4.1.6.1. Aspectos geométricos

Se deben confrontar las especificaciones con los siguientes ítems:

- Recubrimiento longitudinal (máximo, medio y mínimo);
- Recubrimiento lateral (máximo, medio y mínimo);
- Desviación de la línea de vuelo; y,
- Cubrimiento estereoscópico ó fotográfico del área.

Además de los ya mencionados y desde el punto de vista métrico, es muy importante considerar a las deformaciones geométricas que sufre la imagen fotográfica debido principalmente a tres factores: desplazamiento debido al relieve; desplazamiento por inclinación de la cámara y distorsión del objetivo. El desplazamiento debido al relieve es tratado en el apartado de fotogrametría, mientras que la inclinación de la cámara se detalla en el punto 4.1.7. Fotografías aéreas verticales e inclinadas.

**Distorsión del objetivo.** Es muy importante desde el punto de vista fotogramétrico debido a que afecta la posición de los detalles y no a la calidad visual de la imagen; en consecuencia, altera la precisión de las mediciones fotogramétricas. La distorsión se puede clasificar en radial y tangencial.

**Distorsión radial:** es el desplazamiento radial que sufre un punto imagen de su posición ideal. El error de distorsión depende del diseño de la lente, varía entre 5 y 20 $\mu$ .

**Distorsión tangencial:** es la componente de distorsión perpendicular a la dirección radial del punto imagen. Se debe al centrado imperfecto de los distintos elementos (lentes) que componen el objetivo de la cámara; el inconveniente se produce durante el proceso de ensamblado, de modo que no es causado por error de las lentes. Esta distorsión es menor que la radial, en promedio es del orden de 3 $\mu$ .

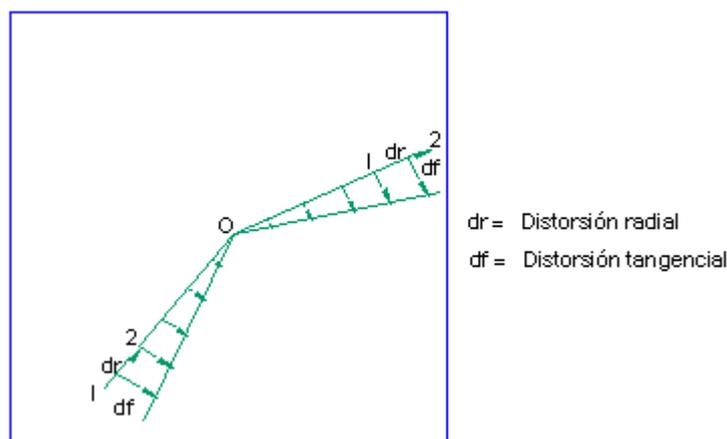


Figura 4.17: Distorsión radial y tangencial.

#### 4.1.6.2. Revelado y copiado

Tanto el negativo como el positivo, se deberá revisar si tiene manchas, velos, imágenes de los registros auxiliares, presencia de puntos negros, colores amarillentos, falta de nitidez, punto caliente, etc.

#### 4.1.6.3. Fallas en los equipos auxiliares

Deben verificarse: señales indicativas de funcionamiento del sistema de vacío, registro de la hora de toma, altura, contadores, etc.

#### 4.1.6.4. Causas varias

Los porcentajes de nubes y sus sombras no deben exceder el 3% del área de cada fotografía; por otra parte se tiene en cuenta el exceso de bruma en el ambiente, el uso de filtros inadecuados o las exposiciones inapropiadas, etc.

### 4.1.7. Fotografías aéreas verticales e inclinadas

La inclinación del eje óptico de la cámara es un parámetro vinculado, por un lado, al tipo de levantamiento aerofotográfico y, por otro, a la calidad del mismo. Para el primer caso, los objetivos y las aplicaciones del levantamiento aerofotográfico definirán la inclinación de la fotografía; para el segundo caso, si el levantamiento fue diseñado para la obtención de fotografías verticales con destino a la realización de mediciones de precisión, las imágenes obtenidas con ángulos de inclinación superiores a 3° sobre la vertical serán consideradas inadecuadas.

#### 4.1.7.1. Fotografías Verticales

Una fotografía aérea se considera vertical cuando la inclinación del eje óptico de la cámara, en el momento de la exposición, es inferior a 2° ó 3°.

#### 4.1.7.2. Fotografías Inclinadas

Una fotografía aérea se considera inclinada cuando el ángulo del eje óptico de la cámara, en el momento de la exposición, varía entre los 3° a los 90° respecto a la vertical; valor normal 7° y 22°. Por otra parte, las fotografías inclinadas pueden ser: **oblicuas**, cuando las tomas se realiza en forma perpendicular a la línea de vuelo, o **convergentes** cuando la inclinación de la cámara es en dirección a la línea de vuelo. En fotografías muy inclinadas aparece el horizonte.

#### 4.1.7.3. Horizontales

Las fotografías horizontales son obtenidas con inclinación de 90° respecto a la vertical y son empleadas en fotogrametría terrestre y en combinación con otros instrumentos de medición como los teodolitos o estaciones totales. Para la obtención de datos del relieve a partir de fotografías horizontales se utilizan restituidores especiales.

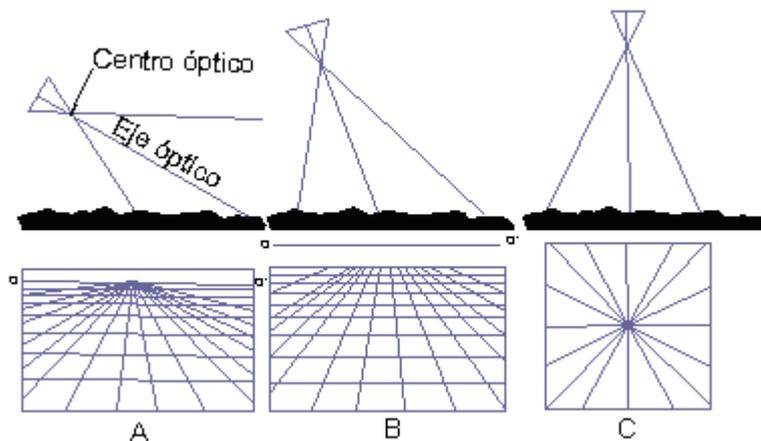


Figura 4.18. Forma del área fotografiada. A: oblicua alta (con horizonte). B: oblicua baja, C: vertical.

Tabla 4.1. Características de las fotografías obtenidas con diferentes inclinaciones de la cámara.

<b>FOTOGRAFÍA</b>			
<b>Características</b>	<b>VERTICAL</b>	<b>INCLINADA</b>	<b>MUY INCLINADA</b>
<b>Inclinación del eje óptico</b>	Menor a 3°	Mayor a 3° pero sin horizonte en el cuadro fotográfico	Muy superior a 3° y con horizonte en el cuadro fotográfico
<b>Forma del área fotografiada</b>	Cuadrada	Trapezoidal	Trapezoidal extendida
<b>Escala</b>	Uniforme para un mismo plano horizontal	Decrece desde un primer plano hacia el fondo	Decrece desde un primer plano y hasta el infinito
<b>Tamaño del área fotografiada</b>	Es función de la altura de vuelo y la distancia principal	Se incrementa en función del ángulo de inclinación	Máxima
<b>Ventajas</b>	Fácil de cartografiar	Mayor área cubierta, puede ser cartografiada con algunos instrumentos convencionales	Económica e ilustrativa por el mayor recubrimiento de terreno
<b>Uso más frecuente</b>	Proyectos fotogramétricos y de fotointerpretación	Fotointerpretación en general	Interpretación del paisaje, de las estructuras geológicas y del relieve

#### 4.1.8. Cámaras fotogramétricas convencionales

Las cámaras fotográficas convencionales son las que utilizan emulsión fotosensible como medio para obtener imágenes de los objetos de interés.

##### 4.1.8.1. Componentes de una cámara aérea fotogramétrica

Una cámara fotogramétrica convencional está constituida por tres partes principales: almacén, cuerpo y cono (Figura 4.19.).

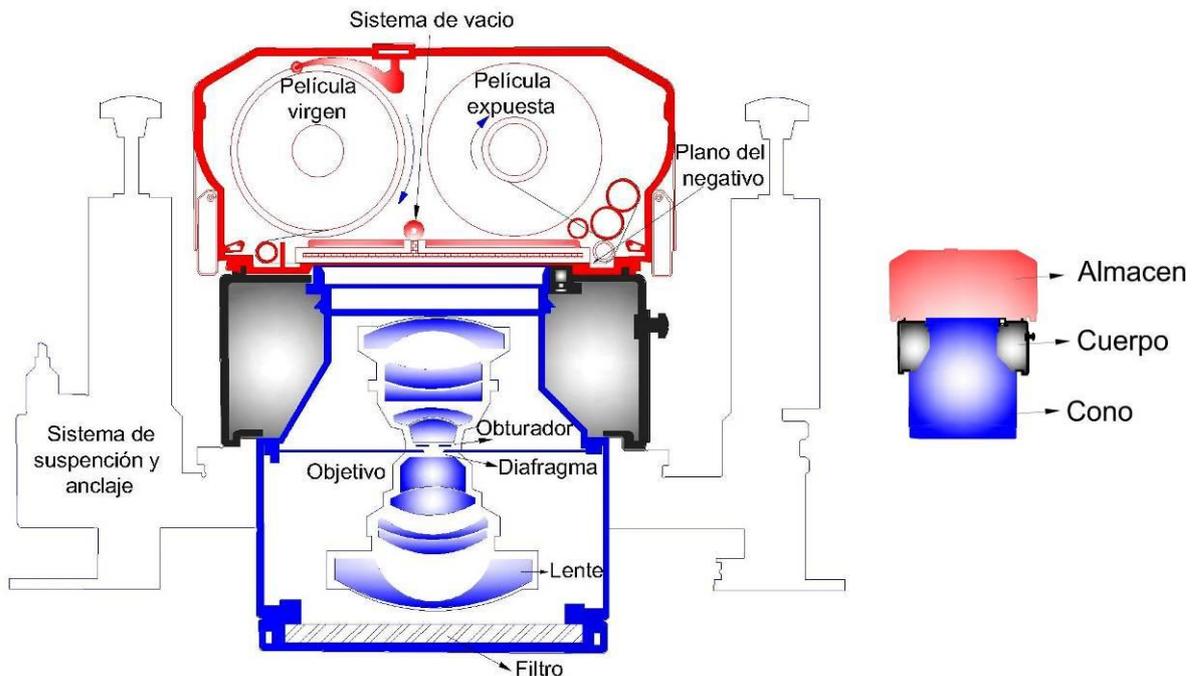


Figura 4.19. Esquema de una cámara fotogramétrica.

##### 4.1.8.1.1. Almacén

El almacén es la parte de la cámara donde se deposita el material fotográfico antes y después de ser expuesto. Puede ser intercambiado durante el vuelo. El almacén posee además un dispositivo mecánico para mover la porción necesaria de película después de cada exposición; el transporte de la película se hace por medio de un motor que recibe su energía del mecanismo principal ubicado en el cuerpo de la cámara.

Debajo de las bobinas con película virgen y expuesta, se ubica un mecanismo llamado **sistema de vacío** para hacer que la película se disponga perfectamente plana sobre el plano focal o plano del negativo durante la toma fotográfica (Figura 4.20). El sistema de vacío consta de una bomba para succionar el aire y de una placa cribada. El aire bombeado circula a través de las cribas, succionando a la película y adhiriéndola al plano del negativo.

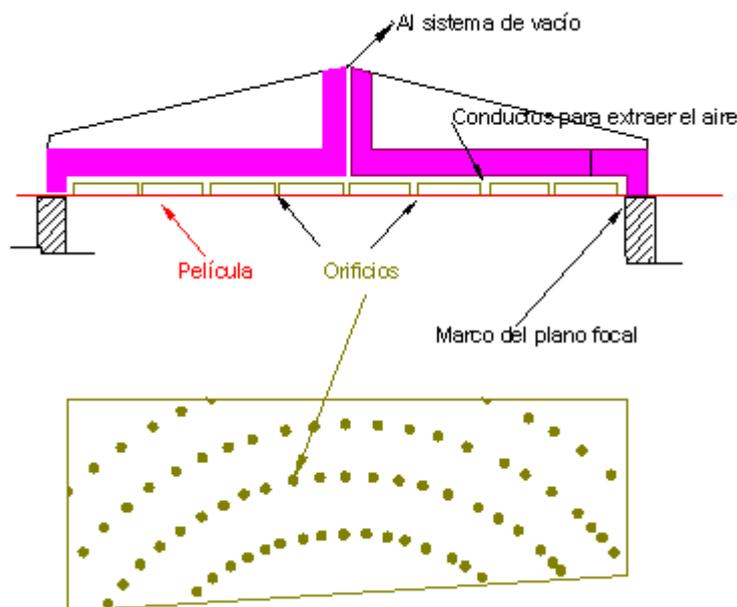


Figura 4.20. Placa cribada del plano focal para adherir el negativo.

#### 4.1.8.1.2. Cuerpo

Cuerpo es la parte de la cámara que une el cono de la lente con el almacén y el sistema de suspensión y contiene además el mecanismo principal.

El mecanismo principal es el que provee de la energía necesaria para hacer funcionar el obturador, operar el sistema de vacío, bobinar la película o cambiar la placa entre exposiciones.

Los factores mencionados determinan el ciclo de la cámara, siendo éste el tiempo transcurrido desde el momento en el cual se toma una fotografía hasta el momento en el que la cámara queda pronta para hacer una nueva exposición. Este tiempo es importante para la toma de fotografías a escala grande pues se requiere un tiempo entre exposiciones muy breve. El ciclo mínimo de una cámara fotogramétrica es de 1.5 a 2 segundos.

El cuerpo de la cámara posee también agarraderas o manijas que permiten su transporte y, eventualmente, las operaciones necesarias para las correcciones por rotaciones de la aeronave durante las tomas fotográficas (Figura 4.19.).

#### 4.1.8.1.3. Cono

Este componente incluye el cono propiamente dicho, el objetivo y las marcas fiduciales (Figura 4.19.); estas últimas están localizadas en el marco que define el **formato**, ya sea en las esquinas, en el punto medio de los lados o en ambas partes. Las marcas fiduciales sirven para ubicar el punto principal de la fotografía.

El marco que define el formato de las fotografías contiene, además de las marcas fiduciales, un área de información con iluminación especial. En dicho sector se ofrecen los datos provistos por: el altímetro, el reloj, el nivel esférico, el contador secuencial (número de orden de las fotografías) y el registro del indicador de funcionamiento del sistema de vacío; por otra parte se dispone de un espacio donde consignar la fecha del levantamiento, nombre de la zona, etc.

El objetivo del cono está compuesto por un conjunto de lentes y por los componentes encargados de regular la cantidad de luz que ingresa al sistema: el obturador y el diafragma; en las cámaras métricas, dichos componentes se ubican entre los paquetes de lentes (Figura 4.19.).

### Obturador

El obturador es el encargado de controlar el tiempo de exposición.

El tiempo de exposición es la duración del paso de la luz a través de la lente. Corresponde al tiempo - expresado en fracción de segundos - comprendido entre el momento en que el obturador comienza a abrirse hasta que queda completamente cerrado. La velocidad del obturador es sumamente importante para que la fotografía no salga "movida" (imagen borrosa) ya sea por el mal ajuste inicial (relación inadecuada entre la velocidad de la aeronave y del disparo) o bien por las vibraciones del avión transmitidas a la cámara.

Los obturadores pueden ser de tres tipos: de cortina, de hojas o de discos giratorios.

De cortina: también llamados de plano focal porque trabajan próximos a dicho elemento de la cámara (Figura 4.21.). Están constituidos por una tela o cortina a prueba de luz con una abertura que se desliza por acción de un resorte sobre la emulsión fotosensible de la película. No se usa en las cámaras fotogramétricas pero sí en las de reconocimiento.

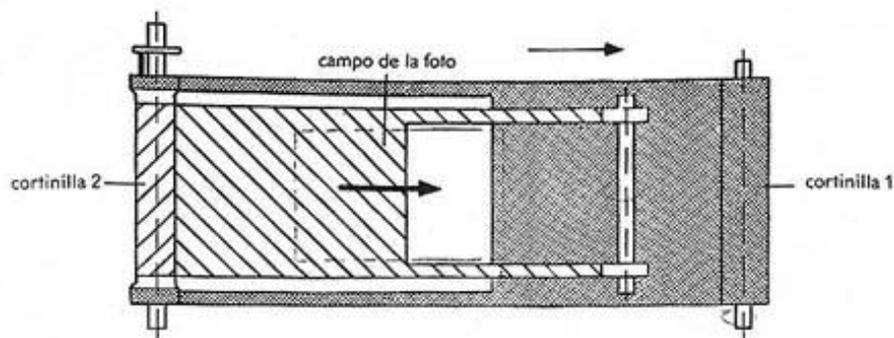
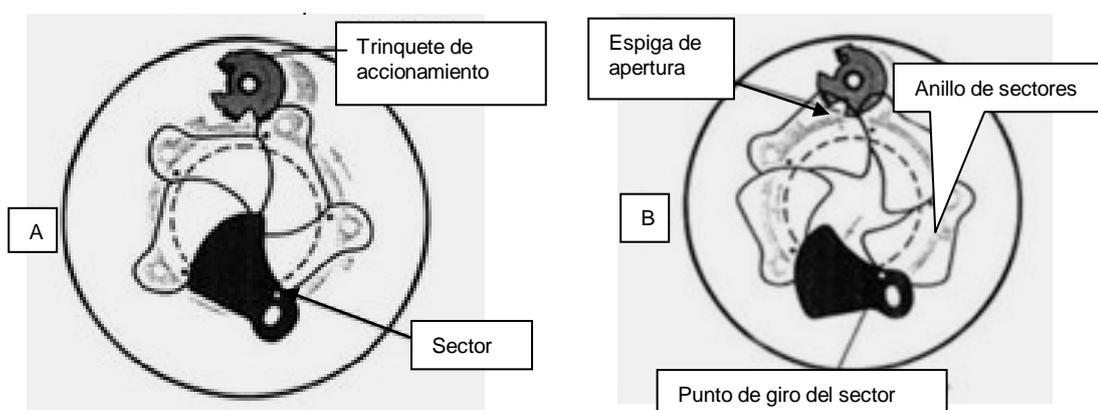


Figura 4.21. Obturador de cortina. Fuente: Barros y Bravo, 2.001.

De hojas: Obturador formado por hojas metálicas; la velocidad de arranque y frenado de las hojas producen vibraciones en la cámara que afectan la nitidez de la imagen. Además, las hojas se abren de adentro hacia afuera y vuelve a cerrarse, por lo tanto la parte central de la película fotográfica recibe más luz que la periferia (Figura 4.22.).



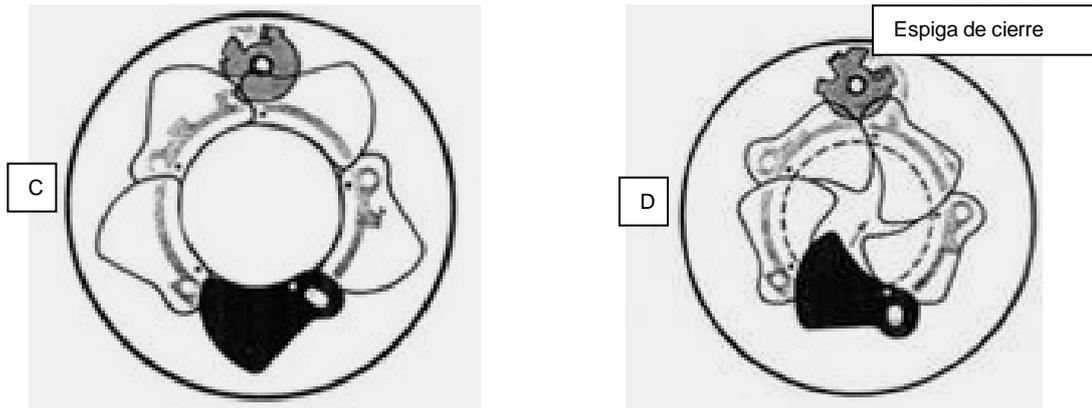


Figura 4.22. Obturador de hojas. Fuente: Barros y Bravo, 2.001.

Centrales o de discos giratorios: son los usados comúnmente en las cámaras métricas pues tienen la ventaja de no producir vibraciones por el arranque o frenado de sus componentes. Los discos giran permanentemente y solo en una posición todas las muescas de los discos y el orificio de la palanca coinciden para dejar pasar el haz de luz.

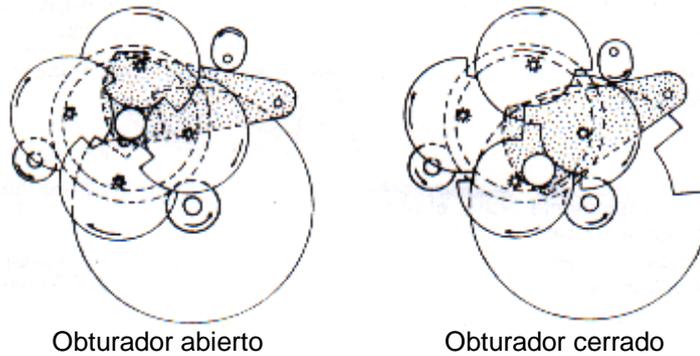


Figura 4.23. Obturador de discos giratorios ó central.

Diafragma

Es el componente encargado de limitar el tamaño del haz de luz que pasa a través de la lente (Figura 4.24).

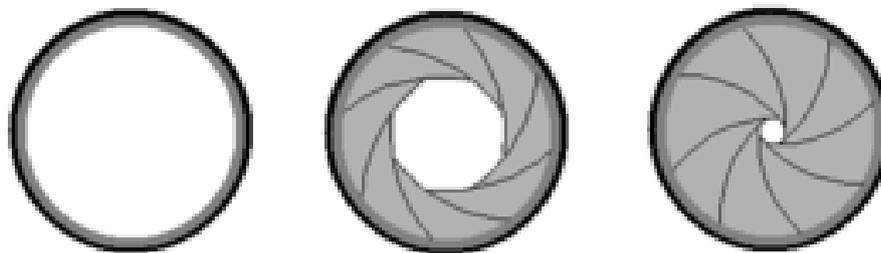


Figura 4.24. Diafragma tipo iris. Tomado de: Boudaud y Renaud, 2.008.

En las cámaras fotográficas, la apertura del diafragma puede ser ajustada en **pasos** discretos para variar el tamaño de la pupila y por lo tanto la cantidad de luz que alcanza a la película o al sensor. Un **paso** de diafragma se corresponde con apertura o cierre del mismo de modo que entre el doble o la mitad de luz que en la situación anterior. Si hablamos de un **paso** en la obturación, nos referimos a la exposición de la película, o el sensor, durante el doble o la mitad de tiempo respecto a la condición anterior.

Debe tenerse presente que, para un incremento del doble en el diámetro de apertura de la pupila (diafragma) la superficie aumenta cuatro veces.

Existe un parámetro, llamado número *f*, que vincula la cantidad de luz que ingresa por un objetivo (luminosidad) y las aperturas del diafragma. Los números *f* son la expresión del cociente entre la distancia focal y el diámetro del diafragma, de manera tal que cuanto más pequeño sea el valor de *f*, mayor será la abertura que permite el paso de la luz (ver: Tabla 4.2. y Figura 4.25.). El valor de *f* es siempre el mismo para cualquier objetivo. Por Ej. el **f: 8** de un objetivo de 15 mm admite la misma cantidad de luz que el **f: 8** de un objetivo de 120 mm.

Si ajustamos los **pasos** de forma tal que cada valor represente la mitad de intensidad luminosa que el precedente - deberemos dividir en dos el área de la pupila de entrada, y su diámetro por la raíz cuadrada de dos -, obtendremos una sucesión llamada escala estándar de números *f* (Tabla 4.2.), formada por aproximaciones de los términos de la progresión geométrica de las potencias de *n*:

$$\sqrt{(2^n)} \quad 0 \leq n < \infty$$

Tabla 4.2. Relación entre el número *f* y la cantidad de luz admitida.

<i>Escala f</i>	1	1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22
<b>Luminosidad relativa</b>	1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64	1/128	1/256	1/512

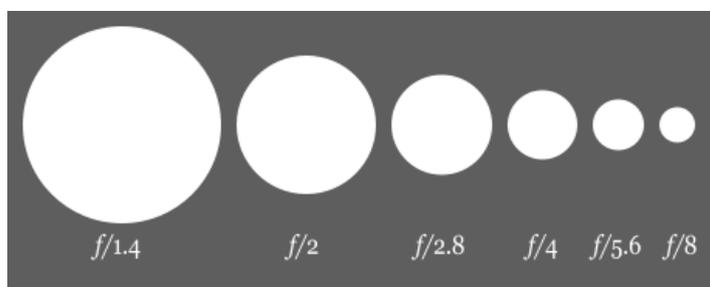


Figura 4.25. Escala estándar de números f crecientes en incrementos de un paso. Tomado de: Enciclopedia Wikipedia, 2009.

Podemos encontrar escalas basadas en medio paso o un tercio de paso:

Escala de medio paso

# 1.0 1.2 1.4 1.7 2 2.4 2.8 3.3 4 4.8 5.6 6.7 8 9.5 11 13 16 19 22

Escala de 1/3 de paso

# 1.0 1.1 1.2 1.4 1.6 1.8 2 2.2 2.5 2.8 3.3 3.5 4 4.5 5.0 5.6 6.3 7.1 8 9 10 11 13 14 16 18 20 22

Los números *f*, llamados también **escalas de diafragma** o simplemente **diafragma**, varían de acuerdo al tipo y complejidad de las cámaras fotográficas. Por lo general, las compactas y más sencillas, no disponen más que de dos o tres aperturas, que suelen estar marcadas con símbolos. Por el contrario, los modelos de cámaras compactas más avanzados así como las réflex disponen de escalas de diafragma muy completas. Por ejemplo, el objetivo planar f:2.8 de 80 mm de Carl Zeiss, utilizado por las cámaras Hasselblad 500 EL/M, cuenta con los

siguientes pasos de  $f$ : 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16 y 22; por su parte, el distagon  $f$ :4 de 50 mm, de la misma empresa, dispone de la escala de diafragmas que va del 4 al 22.

La velocidad de una lente viene dada por su mínimo número  $f$ , que se corresponde con su máxima apertura. Una lente de gran apertura es considerada como rápida, ya que permite usar altas velocidades de obturación. Del ejemplo anterior, el objetivo planar con  $f$ :2.8 es más rápido que el distagon con  $f$ :4. Los fabricantes indican este dato en la montura de los objetivos.

### Filtros

Aunque los filtros no son parte integral del sistema de lentes, deben ser considerados debido a su relación con el paso de la luz proveniente del terreno. Su función principal es la de absorber el color azul y violeta de la bruma, para lo cual se utilizan filtros que varían entre el amarillo, naranja y rojo, dependiendo de la intensidad del filtraje requerido.

- Un filtro azul transmite el azul y absorbe el verde y rojo.
- Un filtro verde transmite el verde y absorbe el azul y rojo.
- Un filtro rojo transmite el rojo y absorbe el azul y el verde.
- Un filtro amarillo (azul negativo) transmite el amarillo, verde y rojo y absorbe el azul (Figura 4.26.).
- Un filtro gris (neutro) absorbe igual cantidad de luz para todos los colores.
- Los filtros magenta y violeta absorben el verde.

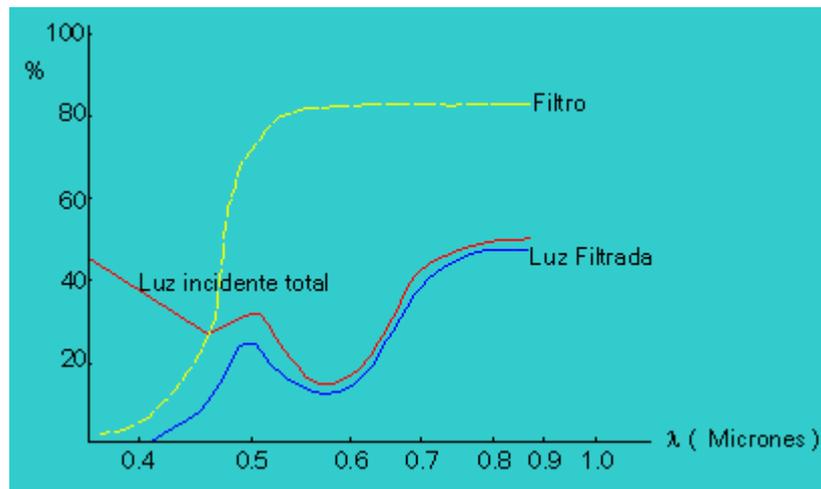


Figura 4.26. Absorción del filtro amarillo (azul negativo).

Filtros anti-vigneting: Cuando se interpone un objeto opaco en el recorrido de los rayos de luz que impresionan la película, se producen sombras en las esquinas de las fotografías causadas por una distribución desigual de la energía transmitida. Esto puede ser evitado con el uso de filtros especiales como el "*anti-vigneting*", el cual compensa esa desigual distribución dejando pasar luz en las esquinas con mayor intensidad que en el centro (Figura 4.27.). Este tipo de filtros se utilizan, por ejemplo, cuando el objetivo de la cámara consta de un obturador de hojas que ilumina por más tiempo el sector central de la película fotográfica.

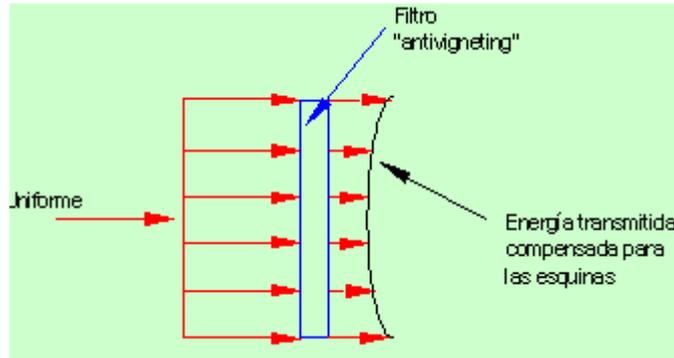


Figura 4.27. Filtro Anti-vigneting.

Una función indirecta de los filtros es la de proteger la lente de la cámara contra partículas de tierra y posibles golpes.



Figura 4.28. Conjunto de componentes de una cámara WILD. Fuente: folleto de promoción.



Figura 4.29. Cámaras Leica RC 30 en tandem con anteojo de navegación. Fuente: folleto de promoción.

En la Figura 4.28. se pueden observar a los diferentes componentes de una cámara fotogramétrica Wild (hoy LEICA): anteojos de navegación, sistema de suspensión, almacenes individuales, intervalómetro, exposímetro automático, cuerpo de la cámara, objetivos – gran-angulares, y súper-gran-angulares - y los diversos filtros, el anti-vigneting entre ellos.

Además de la cámara fotográfica y todos sus componentes y elementos adicionales, el equipamiento necesario para los levantamientos aerofotográficos requiere de una serie de accesorios; entre ellos se cuenta con:

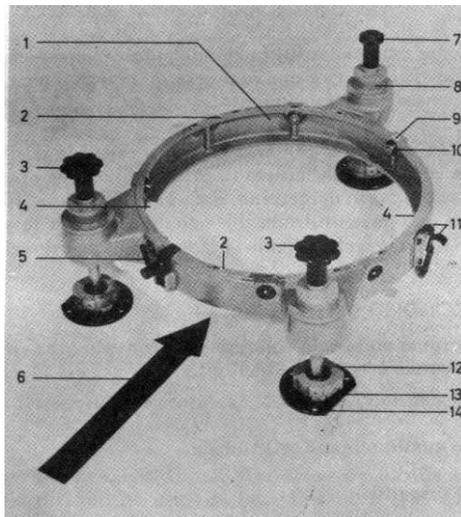
### Sistema de suspensión

El sistema de suspensión (Figura 4.30.) es un equipo imprescindible para controlar vibraciones y rotaciones de la aeronave durante el levantamiento fotográfico.

Los montajes del equipo de suspensión corrientemente empleados son:

- Fijo: la cámara se fija al avión por medio de un marco metálico de modo que cuando se nivela el avión en vuelo, el eje de la cámara queda en la posición deseada; al equipo se le agregan aisladores para absorber las vibraciones.
- Acimutal: básicamente este montaje es igual al anterior con la diferencia que se agrega un anillo, movido por motor eléctrico, que permite girar la cámara alrededor de su eje en  $\pm 30^\circ$ .

c) Estabilizado: tiene correcciones en los ejes x, y, z; este tipo de sistema es el utilizado actualmente con las cámaras métricas, incluyendo en algunos casos un giróscopo que determina la dirección de la vertical y conserva el eje de la cámara en tal posición.

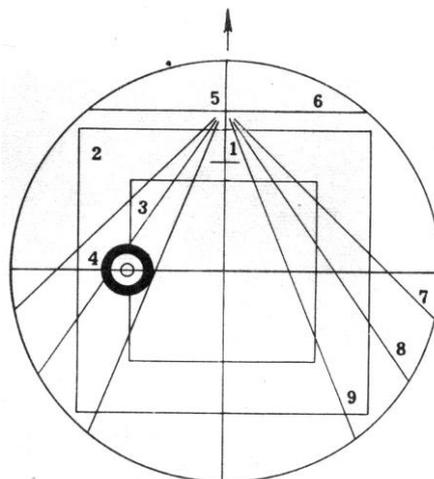
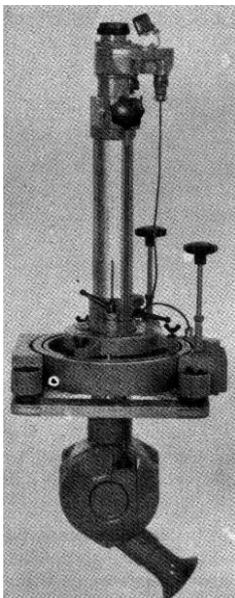


1. Anillo soporte
2. Escala de giro horizontal
3. Tornillos de nivelación
4. Guía para introducir la cámara
5. Tornillo para bloquear giro horizontal
6. Dirección de vuelo
7. Tornillo de nivelación
8. Amortiguador de goma
9. Línea guía roja
10. Rulemanes para giro de la cámara
11. Agarradera
12. Tornillo de fijación
13. Tornillo de fijación
14. Placa de fijación

Figura 4.30. Sistema de suspensión. Tomado de Deagostini Routin, 1971.

### Anteojo de navegación

El anteojo de navegación (Figura 4.31.) permite la observación del terreno sobre el cual se está volando y corregir la desviación de la trayectoria respecto a la línea de vuelo prefijada.



Posición vertical

- 1- Índice para medición de intervalos
- 2- Campo para cámara gran angular
- 3- Campo para cámara normal
- 4- Nivel esférico

Posición inclinada 50%

- 5- Punto de fuga
- 6- Línea de horizonte
- 7- Campo para cámara súper gran angular
- 8- Campo para cámara gran angular
- 9- Campo para cámara normal

Figura 4.31. Anteojo de navegación Wild NF1 y retícula. Tomado de Deagostini Routin, 1971.

### Caja de control o intervalómetro

El intervalómetro (Figura 4.32) es un instrumento que posee una serie de computadores para gobernar todo el funcionamiento de la cámara:

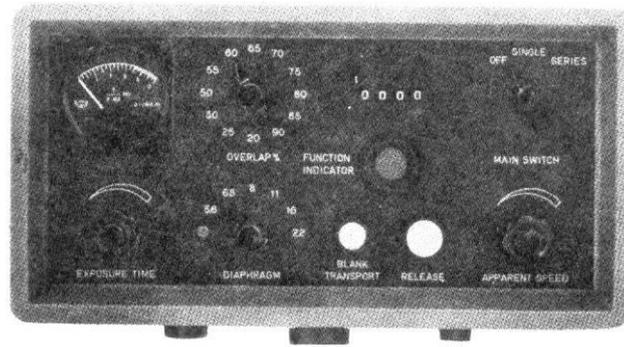
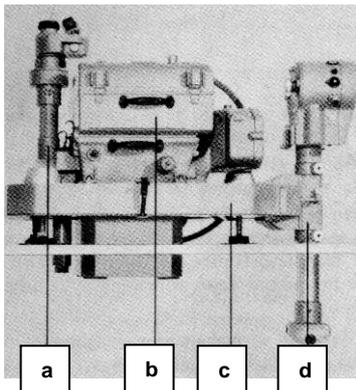


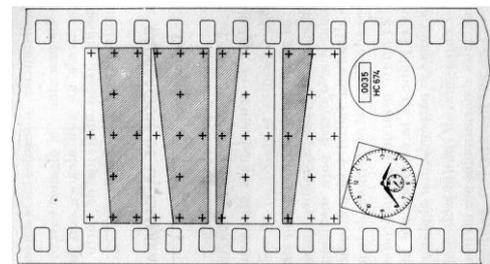
Figura 4.32. Caja de control o intervalómetro de la cámara Wild RC10. Tomado de Deagostini Routin, 1971.

Equipo auxiliar de navegación

El equipo auxiliar para la navegación aerofotográfica esta generalmente integrado por una Cámara de horizonte (Figura 4.33), que permite calcular la inclinación de la fotografía; un Giróscopo, mencionado anteriormente; el Radar altimétrico, que mide la altura de vuelo sobre el terreno; y el Estatoscopio, que mide el alejamiento del avión de una curva isobárica y permite calcular la diferencia de altura entre tomas fotográficas.



- a- Anteojo de navegación
- b- Cámara WILD RC8
- c- Sistema de suspensión PAV2
- d- Cámara de horizonte HC1



Representación esquemática de un registro.

Figura 4.33. Cámara de horizonte y ejemplo de un registro.

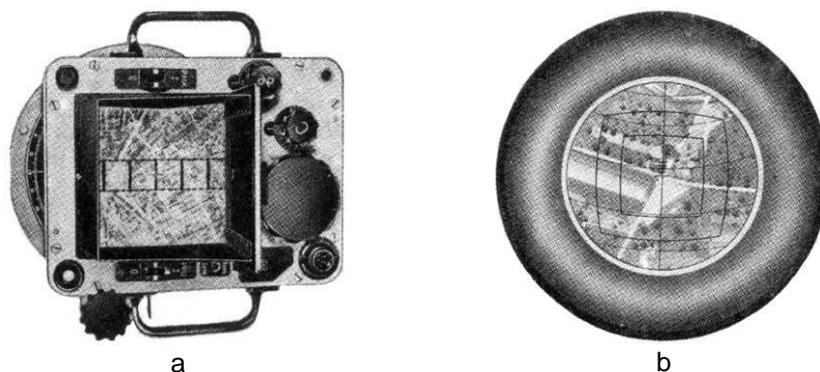


Figura 4.34. Visores o anteojos de navegación: a) cámara Zeiss con "escala". que regula los recubrimientos longitudinales, b) cámara Wild con "recuadro". Tomado de: Deagostini Routin, 1971.

#### 4.1.8.2. Clasificación de las Cámaras Aéreas Convencionales

##### 4.1.8.2.1. En función de su tipo o formato

###### Con formato

Las cámaras con formato son aquellas que tienen limitado el cuadro fotográfico mediante un marco definido en cono; pueden ser de formato **Rectangular** (18 x 12 cm) o **Cuadrado** (18 x 18 cm - 23 x 23 cm).

Las cámaras con formato pueden clasificarse en función del campo angular de la lente en (Figura 4.35.):

**Cámaras Normales:** campo angular menor a 75°, objetivo 210 mm.

**Cámaras Gran angulares:** campo angular entre 75°-100°, objetivo 150 mm.

**Cámaras Súper gran angulares:** campo angular mayor a 100°, objetivo 90 mm.

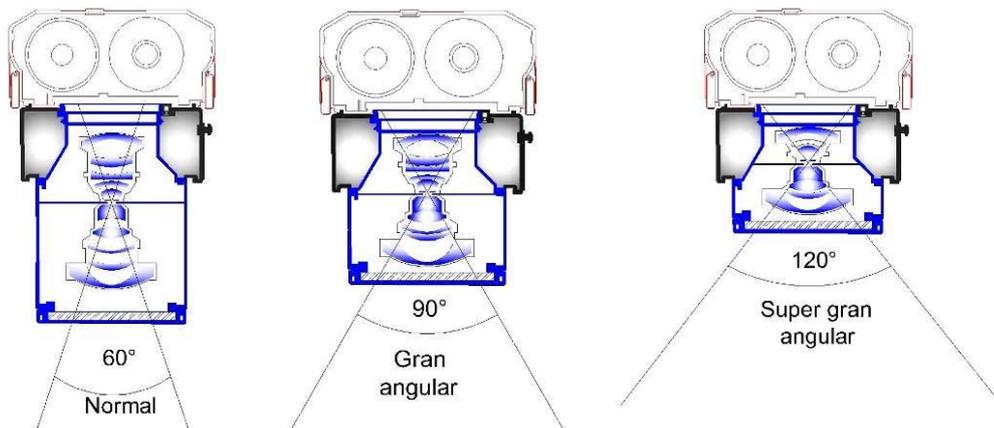


Figura 4.35. Cámaras según el campo angular del objetivo.

###### Sin formato

**Panorámicas:** producen el barrido del terreno en forma perpendicular a la línea de vuelo. Los mecanismos de barrido pueden ser por espejo giratorio o por lente giratoria según el modelo (Figura 4.36.). La película permanece fija durante el barrido; el ángulo que cubren es menor a 180° (normalmente 140°). No se usan para proyectos cartográficos.

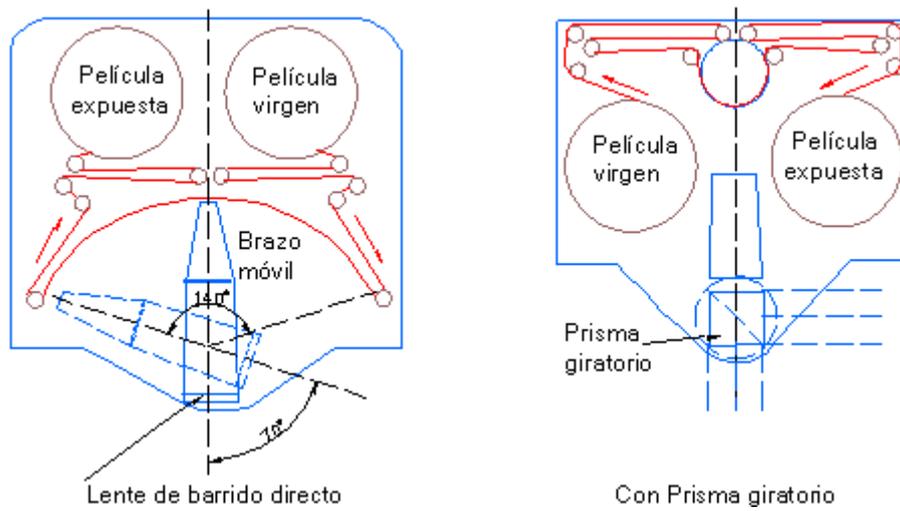


Figura 4.36. Esquema de cámaras panorámicas.

**Continuas:** produce la imagen de una faja de terreno exponiendo a través de un orificio fijo, una película que se mueve constantemente sincronizada con la velocidad del terreno. Es decir que produce a lo largo del tiempo una imagen continua de forma rectangular (Figura 4.37.).

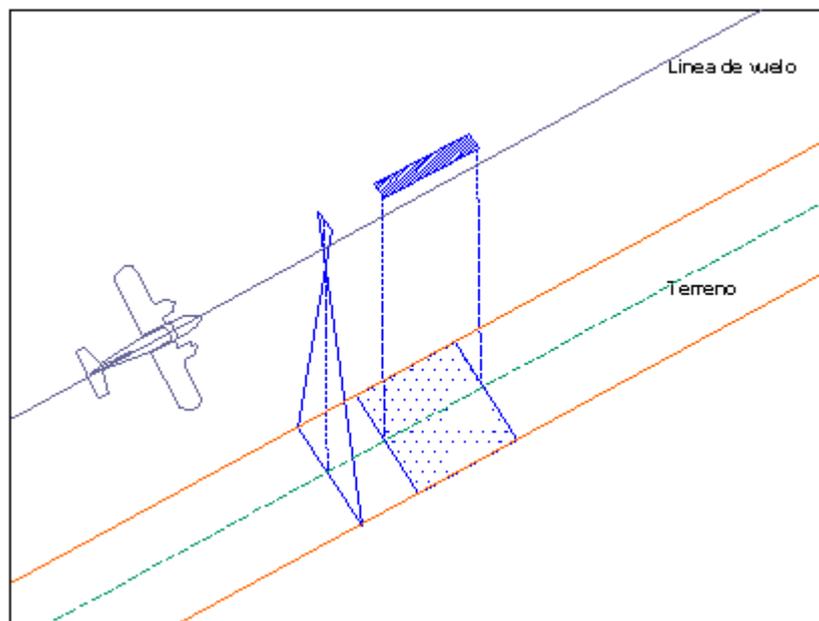


Figura 4.37. Principio de las cámaras continuas.

#### 4.1.8.2.2. En función del uso

##### Cámaras de Reconocimiento

Tienen la finalidad de producir imágenes para la identificación de objetos pero no sirven para realizar operaciones métricas. Ejemplo: cualquier cámara comercial corriente.

### Cámaras Métricas

Su principal objetivo es el de producir imágenes para realizar con ellas cualquier tipo de medición. De las más conocidas en la actividad fotogramétrica se pueden mencionar a las siguientes cámaras: Wild, Zeiss, Zeiss Jena, Fairchild, Santoni.

### Cámaras Especiales

Su diseño obedece a un propósito especial como ser la fotografía infrarroja o nocturna, etc.

#### **4.1.8.2.3. En función del material fotográfico**

De acuerdo a la precisión requerida en los levantamientos aéreos se utilizan diferentes bases para la emulsión fotográfica, ellas son: **placa**, base de vidrio o **película**, base de acetato. La base de vidrio es solo utilizada para levantamientos urbanos donde el precio de la tierra es muy elevado.

#### **4.1.8.2.4. En función del número de objetivos**

##### De un objetivo

Son las cámaras fotogramétricas más comunes que poseen un cono con un solo objetivo.

##### De varios objetivos (multilente)

Fueron desarrolladas con el fin de obtener simultáneamente varias fotografías del mismo sitio en bandas diferentes del espectro electromagnético. Con sistema multiespectral, se pretende obtener información de los mismos objetos en diferentes longitudes de onda para una mejor interpretación de las características y condiciones de las cubiertas del suelo, por ejemplo: cultivos, vegetación natural, etc. (Figura 4.38.). Un concepto similar utilizan los barredores multiespectrales satelitales.

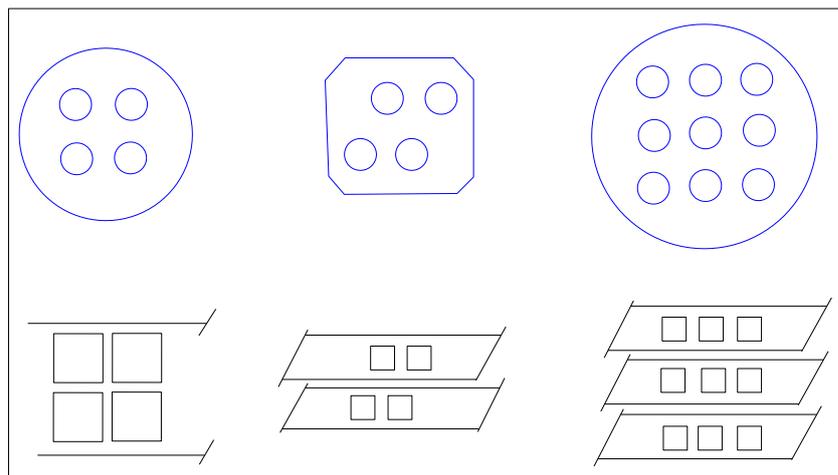


Figura 4.38. Cámaras multiespectrales. Distribución de las lentes en el cono y de las imágenes en la película fotográfica.

### 4.1.8.3. La formación de la imagen con cámaras analógicas

#### 4.1.8.3.1. Sensibilidad cromática - Tipos de Emulsiones

**Emulsiones No Cromatizadas o Ciegas:** son aquellas sólo sensibles a las radiaciones UV y azules. Se utilizan corrientemente en el proceso positivo y pueden ser manejadas en un laboratorio iluminado con luz amarilla o roja, ya que no son sensibles a esos colores.

**Emulsiones cromatizadas:** se dividen de acuerdo a las longitudes de onda en:

- **Emulsiones Ortocromáticas**
- **Emulsiones Pancromáticas**
- **Emulsiones Infrarrojas**

**Emulsiones Ortocromáticas:** por no ser sensibles al rojo hacen que las imágenes no presenten el mismo contraste que las imágenes reales, por eso son escasamente empleadas en la toma fotografías aéreas. Por su gran sensibilidad al verde sólo fueron usadas para estudios especiales de vegetación; esta antes de que se conocieran las bondades y aplicaciones de las emulsiones infrarrojas.

**Emulsiones Pancromáticas:** proporcionan una imagen con contrastes semejantes a los observados por el hombre. Proporcionan buena definición de la imagen y no requieren cuidados especiales. Pueden ser empleadas en cualquier latitud, durante cualquier época del año.

**Emulsiones Infrarrojas:** brindan excelente información para la diferenciación de tipos de vegetación y distinguen las áreas húmedas de las secas. Requieren cuidados especiales de humedad y temperatura.

IR Blanco y Negro: las latifoliadas reflejan más que las coníferas, por lo tanto se distinguen perfectamente.

IR Color: diferencia la vegetación sana de la enferma; detecta camuflaje (objetos pintados de verde pero que aparecen de color azul-púrpura).

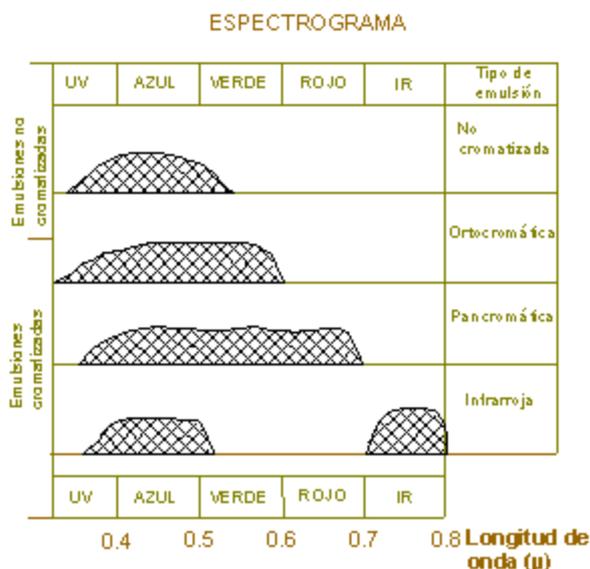


Figura 4.39. Espectrograma y tipo de emulsiones.

#### 4.1.8.3.2. Velocidad de una emulsión

La sensibilidad de una película fotográfica corresponde a la velocidad con que su emulsión fotosensible reacciona a la luz.

Los estándares internacionales de medida son: DIN (Deutsches Institut für Normung, Instituto Alemán de Normalización), ASA (American Standard Association, Asociación Americana de Estándares) y ANSI e ISO (Internacional Standard Office, Oficina Internacional de Estandarización).

Tabla 4.3. Relación entre las unidades estándares de sensibilidad de una emulsión fotográfica.

DIN	ASA / ISO
16	32
17	40
18	50
19	64
20	80
21	100
22	125
23	160
24	200
27	400
30	800
32	1600
34	2000

Cuanto mas chico es el cristal de haluro de plata menor es la sensibilidad de la película, pero por el contrario mayor es el poder de resolución y permite mayores ampliaciones.

Las películas se clasifican en función de su sensibilidad de la siguiente manera:

**Sensibilidad baja** (o **películas lentas**): hasta ASA / ISO 64. Poseen un grano extremadamente fino y una escala tonal muy amplia. Permiten hacer grandes ampliaciones sin que el grano sea perceptible. Estas películas se emplean cuando se requiere un gran detalle en la imagen, con objetos estáticos y cuando hay buena iluminación o cuando son posibles largas exposiciones con trípode.

**Sensibilidad media**: desde ASA / ISO 100 hasta 200. Suelen considerarse como sensibilidades todo-terreno, por lo que son las más usadas. Tienen una amplia escala tonal y permiten ampliaciones de hasta 30 cm x 40 cm con grano apenas perceptible.

**Sensibilidad alta** (o **películas rápidas**): desde ASA / ISO 200 hasta 3200. Presentan un bajo contraste. El grano es grueso y evidente en las ampliaciones por lo que la imagen pierde definición. Se utilizan en fotografías de acción donde se requiera congelar el movimiento o en situaciones de escasa iluminación.

#### 4.1.8.3.3. El proceso fotográfico

Los componentes de la película fotográfica son la **Base** y la **Emulsión**:

##### Base

Es el soporte de la emulsión y debe satisfacer ciertas propiedades:

Debe ser químicamente estable, no afectable por los productos químicos empleados en el revelado y resistente a la humedad y temperatura.

Físicamente debe ser fuerte y resistente pero no quebradizo, duro pero flexible, resistente a la tensión y dimensionalmente estables.

Materiales: a) acetatos o poliéster de 0.1 mm a 0.25 mm de espesor; b) placas de vidrio, de 1.25 mm a 5 mm de espesor, las que deben ser claras, incoloras y libres de toda impureza.

### Emulsión fotográfica

Se compone de cristales de Halogenuro de Ag y Gelatina.

Cristal de Bromuro de Plata: el BrAg cristaliza en el sistema cúbico, como todos los haluros de los metales alcalinos, con tres ejes de simetría idénticos y perpendiculares entre sí. Los átomos se distribuyen en los vértices del cubo en la llamada red cristalina (Figura 4.40. a.). El aspecto exterior del cristal puede variar, según la naturaleza del cuerpo y su forma de obtención, por truncado de aristas (ángulos diedros) o de los vértices (ángulos triedros). Esta es la causa de que el BrAg se presente bajo la forma de láminas hexagonales o triangulares y de cubos o bastoncillos con los vértices redondeados (Figura 4.40. b.). La primera forma se obtiene por precipitación en medio neutro y al segunda en medio amoniacal.

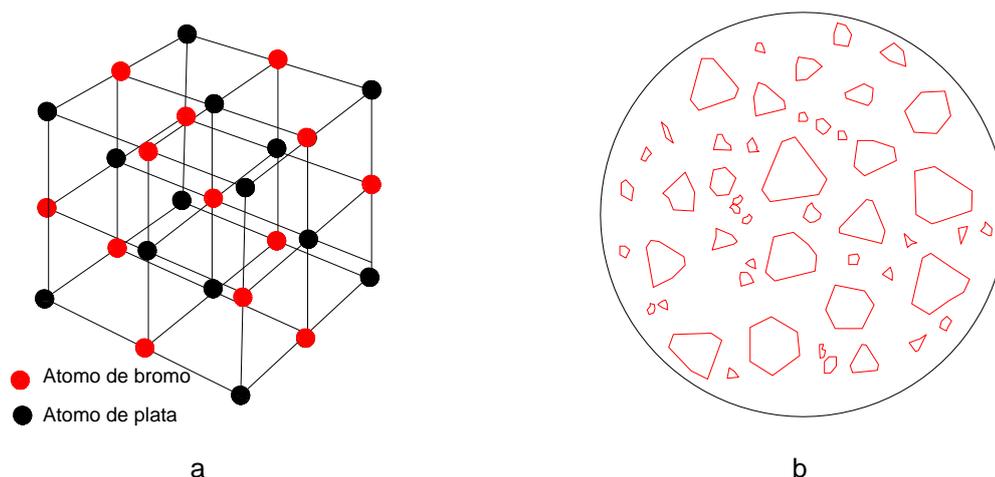


Figura 4.40. a, Sistema cúbico de cristalización del BrAg; b, Formas y tamaños de los haluros de plata.

La reacción fotoquímica del cristal de BrAg depende de la imperfección de la red cristalina, se demostró que la luz no puede actuar sobre un cristal perfecto, y que, cuanto más deformado se encuentre, más fácilmente se descompone. Entonces, si se desea obtener un gelatinobromuro muy sensible al precipitado cristalino, debe presentar defectos en su estructura.

Las imperfecciones pueden ser por tensiones internas durante la precipitación y por la interpenetración de otros cristales en forma de maclas. Estas deformaciones son más favorecidas por la fuerte tensión mecánica de la gelatina al secarse. La adición de IAg al BrAg dilata la malla de manera irregular, ya que la cristalización de dos sales nunca es perfecta.

Los cristales de plata varían de 3 a 5 $\mu$  de tamaño y constituyen el 30 a 40% de la emulsión. El espesor de la capa de emulsión es de aproximadamente 10 m $\mu$ .

Las características de una emulsión están determinadas por la sumatoria de propiedades de cada uno de los cristales que la componen. La gelatina no sólo produce tensión sobre los cristales al secarse, sino que sirve para mantener a los halogenuros sobre la base, regula

además los tamaños de éstos y aumenta la sensibilidad luminosa mediante algunos de sus componentes secundarios.

Las emulsiones empleadas sobre el papel difieren de las negativas en los siguientes puntos:

- Los halogenuros utilizados;
- El menor tamaño de los granos;
- La concentración de los cristales; y,
- La velocidad de la emulsión.

### Imagen latente

La luz es una forma de energía electromagnética que al incidir sobre un objeto puede ser reflejada, transmitida o absorbida. Si es absorbida, se produce una conversión de energía que se manifiesta en forma de desprendimiento de calor o de reacción química. Cuando la luz es absorbida por los cristales de plata de la emulsión, se produce la descomposición de éstos, según la siguiente reacción:



De esta forma, partículas de halogenuros de plata son transformados en plata metálica, estas trazas son tan insignificantes que la capa fotosensible queda en apariencia inalterada. Las trazas metálicas se forman en gran número, donde llegó una gran cantidad de luz, mientras que son menos numerosas en los lugares donde la luz ha tenido menos influencia. Esto es la imagen latente, está allí pero no se ve.

La proporción media de  $\text{Ag}^0$  que forma la imagen latente es aproximadamente 1 (un) átomo por 10 (diez) millones de moléculas de  $\text{BrAg}$ .

Mecanismo de formación de la imagen latente:

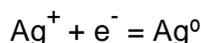
1.- **Fenómeno fotoquímico primario:** un cuanto de energía luminosa (fotón) penetra en el cristal de  $\text{BrAg}$ , actúa sobre el ion  $\text{Br}^-$  en el nivel energético exterior y le cede su energía, esta energía permite al  $\text{Br}^-$  expulsar su electrón suplementario, para pasar a átomo de  $\text{Br}$  libre (con 7 electrones periféricos en lugar de 8 del ion  $\text{Br}^-$ )



Como la reacción es reversible se debe fijar al  $\text{Br}$  para que no se recombine. La gelatina es el receptor del  $\text{Br}$ .

2.- **Corriente electrónica a través de la red cristalina:** por ser una red donde los átomos están muy próximos, no hay bruscas diferencias de potencial entre los iones adyacentes, entonces los electrones pueden recorrer grandes distancias. Esos electrones en movimiento encuentran un nivel de energía inferior y se acumulan en "centros de sensibilidad",  $\text{Ag} + \text{Ag}_2\text{S}$  (productos sulfurados de  $\text{Ag}$ ). Los productos sulfurados provienen de la gelatina y la plata metálica por descomposición parcial de la capa superficial del cristal por hidrólisis, y dan lugar a campos eléctricos negativos.

3.- **Corriente iónica de iones  $\text{Ag}^+$ :** el campo eléctrico negativo atrae a los iones  $\text{Ag}^+$  y se desplazan más rápidamente cuanto más irregular sea la malla; capturan a los electrones reunidos alrededor de los centros de sensibilidad y dan origen a átomos de  $\text{Ag}^0$ , fijos sobre estos mismos centros.



Cuando hay un número suficiente de átomos de  $\text{Ag}^0$ , forman los gérmenes de la imagen latente.

Procesos de laboratorio

**Revelado**

Consiste en la reducción de los granos de bromuro al estado de Ag<sup>0</sup> que forma la imagen visible; sólo reduce los granos expuestos a la luz, o sea los que tienen gérmenes de la imagen latente.

El revelador contiene una sustancia reductora que cede electrones que son captados por el oxidante (Ag<sup>+</sup>), el reductor se oxida y el oxidante se reduce.



La reducción sólo se produce alrededor de los gérmenes de revelado, y éstos están formados por 4-5 átomos de Ag.

**Influencia del Bromuro Soluble:** la acción del álcali sobre el ácido bromhídrico da origen a un bromuro soluble.



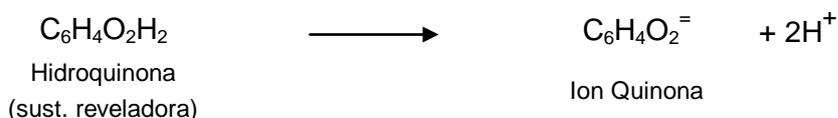
Se agrega al revelador BrK para evitar el "Velado Químico" (o niebla del revelado) producido por una intensa reducción del BrAg no sensibilizado por la luz.

El producto de las concentraciones de los iones Br<sup>-</sup> y Ag<sup>+</sup> tienen un valor constante: Br<sup>-</sup> x Ag<sup>+</sup> = Cte. (también llamado Producto de Solubilidad).

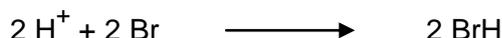
Al agregar BrK o BrNa, se aumenta la concentración de iones bromuro y disminuye la concentración de iones Ag<sup>+</sup>, pues Cte. es una constante.

Si disminuye la concentración de iones Ag<sup>+</sup>, baja el potencial de oxidación de los iones Ag<sup>+</sup> y la reducción se hace menos enérgica. El revelado es frenado por la formación o adición de bromuro soluble. Un revelador usado y que contiene gran cantidad de bromuro soluble (procedente de la reducción del BrAg), no tiene poder revelador aunque contenga abundante revelador.

**Influencia del Sulfito:** El sulfito de sodio se agrega para mantener inalterado el revelador de la oxidación atmosférica; produce durante el revelado la eliminación en forma oxidada de la sustancia reveladora, haciéndola pasar a una forma sulfonada (acción conservante).



Los iones H<sup>+</sup> se combinan con el ion bromuro para dar ácido bromhídrico.



Con el oxígeno del aire, la hidroquinona y el sulfito forman el derivado sulfonado:





### **Lavado**

Mediante el lavado se produce la eliminación de sales solubles del fijador y ésta se produce por ósmosis a través de la capa de gelatina.

Si el lavado es insuficiente, parte del hiposulfito de Ag soluble permanecerá sobre la imagen y ésta se tornará amarilla.

### Equipo fotográfico de laboratorio

#### **Aparato revelador para películas aéreas**

Aunque una misión fotográfica haya resultado aparentemente exitosa, nunca podrá afirmarse tal cosa hasta comprobar que el material fotográfico obtenido es de buena calidad.

Efectivamente, la misión pudo ser exitosa, pero un pequeño error en el laboratorio puede anular todo el trabajo.

Para evitar tales inconvenientes se emplean tanques reveladores especiales para película, en los cuales se trabaja con mayor seguridad y sencillez. Estos aparatos se basan en el principio de que imágenes tomadas en condiciones similares deben ser tratadas también en forma similar.

En la

Figura 4.41. se muestra el equipo para revelado automático de Zeiss, modelo FE 120; el mismo está formado por tres tanques metálicos para baños, dos bobinas con mecanismo de inversión y un motor eléctrico.

Los tanques metálicos para revelado son de acero inoxidable y cada uno tiene un desagüe para su fácil limpieza y para asegurar la circulación continua del agua durante el lavado.

La película puede pasar del almacén de la cámara directamente al porta-bobinas del revelador y en éste puede ser movida a mano o por medio del motor eléctrico.

La velocidad de marcha puede ser regulada por medio de un reóstato y adaptada a la longitud de la película para que el líquido fotográfico cubra la emulsión en forma continua y uniforme.

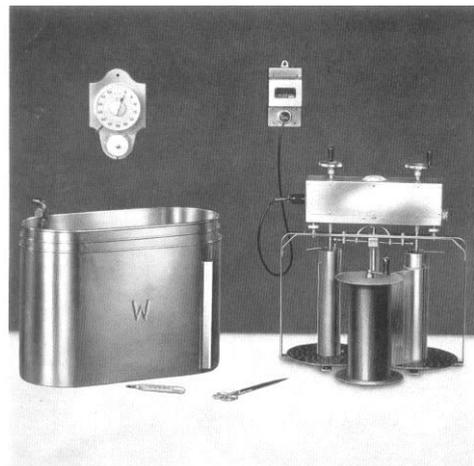


Figura 4.41. Sistema de revelado: tanques para revelado, fijado y lavado. Porta bobinas a motor y manual. Tomado de: Folleto ZEISS.

### **Aparato secador de películas aéreas**

La utilidad de películas en trabajos fotogramétricos de precisión puede ser considerablemente reducida si aparecen rasguños, ralladuras o adherencias de polvo en el negativo. Para disminuir la probabilidad de que aparezca uno de estos inconvenientes se emplea una secadora de película como la que se muestra en la Figura 4.42. Mediante el movimiento automático la película no es sometida a tensiones y es secada mediante la acción de aire filtrado y entibiado a la temperatura deseada.

El tiempo de secado requerido para materiales estables (120 metros de película) en condiciones normales (20° de temperatura y 50% de humedad), es de aproximadamente 2 horas y 1/2. El tiempo puede reducirse a 1 ½ hora aumentando la temperatura, pero no se pueden garantizar las condiciones de estabilidad.

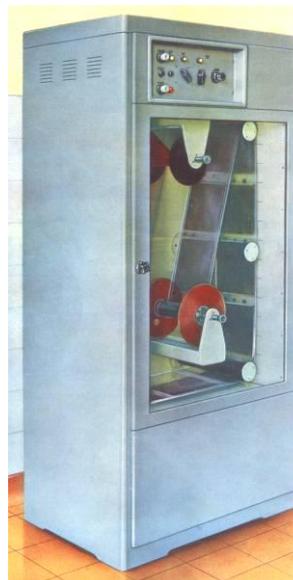


Figura 4.42. Secadora de películas. Tomado de: Folleto ZEISS-JENA.

### **Copiadora de contacto**

Terminado el vuelo fotográfico y luego de revelado el rollo (o placas negativas) es necesario obtener copias positivas de estas imágenes, ya sea sobre papel, película o placa para que puedan ser utilizadas en la interpretación, o instrumentos fotogramétricos para triangulación o restitución.

Para obtener estas copias del negativo original debe emplearse una copiadora de contacto, es decir, una máquina que permita copiar negativos de películas en rollo (o cortados) o placas hasta un tamaño de 30 x 30 cm.

En general, este instrumento permite hacer copias negativas y positivas (diapositivas), asegurando un perfecto registro entre el original y la copia; posee además iluminación uniforme de luz fría y gran latitud en los tiempos de exposición. Las lámparas pueden ser encendidas en series o individualmente, permitiendo así compensaciones de tonos al hacer las copias.



Figura 4.43. Copiadora de contacto. Tomado de: Folleto ZEISS-JENA.

La Figura 4.43. representa la copiadora de contacto Zeiss KG 30, formada por una caja metálica que en la parte superior contiene una placa de cristal sobre la cual se coloca el material negativo (o positivo) a copiar. La cara interior de la tapa posee un cojín neumático cuya presión es regulada por una válvula y un manómetro. Al cerrar la tapa, el cojín ejerce presión entre el original y la copia para lograr un perfecto contacto entre ambos aunque éstos sean de diferente espesor.

A ambos lados de la caja se encuentran los soportes para las bobinas de la película.

Por debajo de la placa de cristal hay tres guías en las cuales se pueden colocar láminas de cristal utilizadas como filtro.

Una lámina de cristal opaca sirve para dispersar la luz y producir iluminación muy pareja. La placa verde se utiliza como filtro para ampliar el tiempo de exposición.

En el fondo del cajón de iluminación están las diferentes lámparas montadas uniformemente. En total hay 39 lámparas de luz fría (luz azulada para hacer la exposición), 4 lámparas de luz roja para colocar el material sensible y 2 de luz blanca para exploración de la imagen.

Todas estas lámparas, así como el reloj para control del tiempo de exposición son regulados desde el tablero frontal.

### **Equipo de procesado rápido**

Una vez obtenidas las fotografías y revelado el negativo original, se deben hacer las copias positivas en papel las que luego serán reveladas, fijadas, lavadas y secadas.

Con el objeto de acelerar el mencionado proceso para fotografías en blanco y negro a granel, se han desarrollado equipos basados en la acción de químicos especiales (un activador y un estabilizador); en tal caso, el proceso total se desarrolla en sólo unos 15 ó 20 segundos.

Utilizando los equipos de procesado a granel, se obtienen imágenes fotográficas con calidad algo inferior a las procesadas con los métodos tradicionales, sin embargo, pueden ser utilizadas convenientemente para trabajos de interpretación.

Varias compañías han desarrollado también equipos más sofisticados como las reveladoras automáticas para el procesamiento de películas aéreas en rollos.

En la fotografía **a** de la Figura 4.44. puede observarse la secuencia establecida en las máquinas de proceso rápido para automatizar todo el procedimiento: el rollo de película pasa por los tanques de revelado, fijado y lavado para finalmente ser secado y enrollado nuevamente.

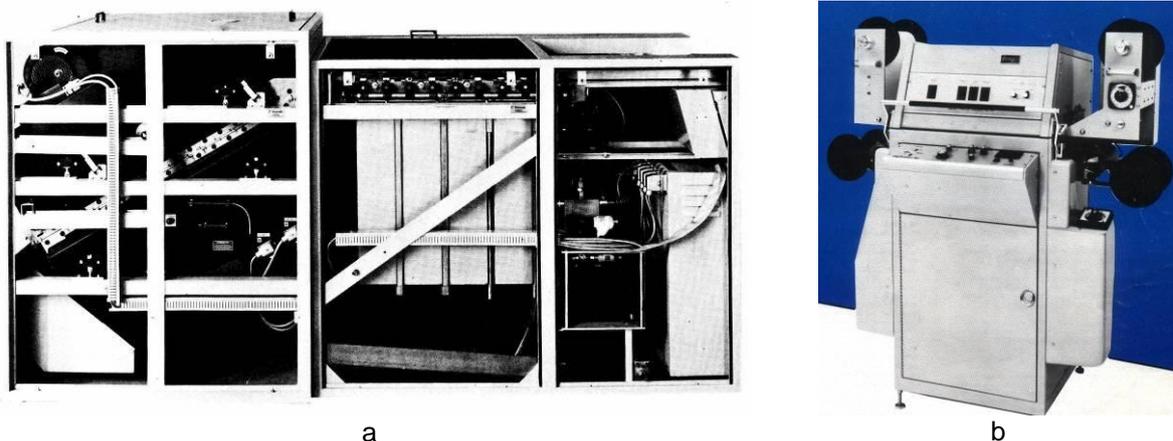


Figura 4.44. a, Máquina automática LogEtronic C-24; b, Copiadora continua para película blanco y negro con compensación electrónica de tonos. Tomado de: Folletos LogEtronic.

Los tiempos de permanencia del rollo en cada baño son regulados por la velocidad con que se mueve la película y están en función del tiempo de exposición, la intensidad lumínica recibida, la sensibilidad de la emulsión, entre otros parámetros.

En las copiadoras continuas (Figura 4.44. b), la bobina de película negativa y el rollo de papel virgen son ingresados al equipo; a medida que avanzan ambos apareados se hace la exposición, quedando el material listo para el revelado. Durante la exposición se realiza la

compensación electrónica de tonos. En la Figura 4.45. la fotografía **a** presenta sectores con sobre exposición y otros subexpuestos; mientras que, la fotografía **b**, tiene sus tonos compensados electrónicamente.

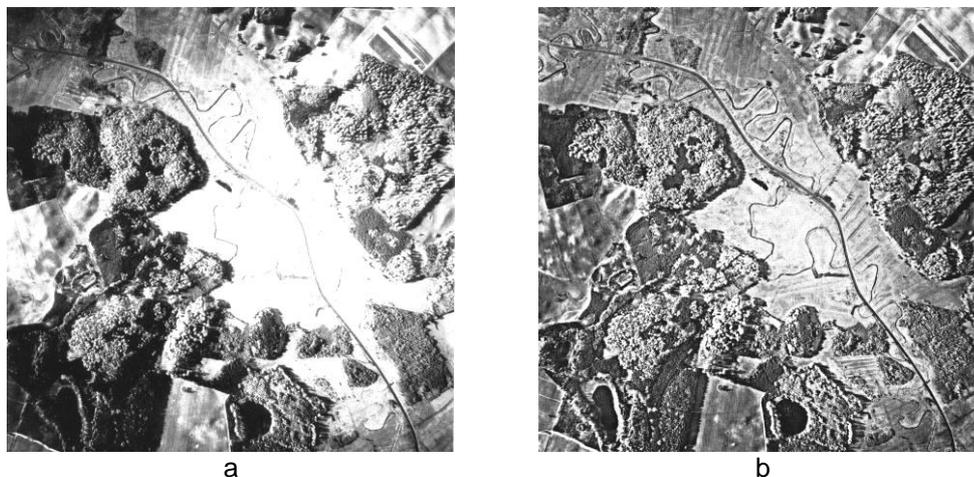


Figura 4.45. a, Imagen sin compensación electrónica de tonos; b, Imagen compensada.  
Tomado de: Folletos Zeiss Jena.

Para justificar los costos de los equipos automáticos se requiere un gran volumen de trabajo; de otra forma será más eficiente el procesado individual de la fotografía en un laboratorio convencional.

### ***Pupitre de exploración***

Es una mesa con superficie transparente que permite explorar el material negativo para confeccionar el trayecto aéreo, evaluar la calidad de las fotografías, verificar los empalmes entre fajas y el recubrimiento longitudinal entre los fotogramas. Consta de una superficie luminosa con dispositivo de rebobinado (Figura 4.46.).

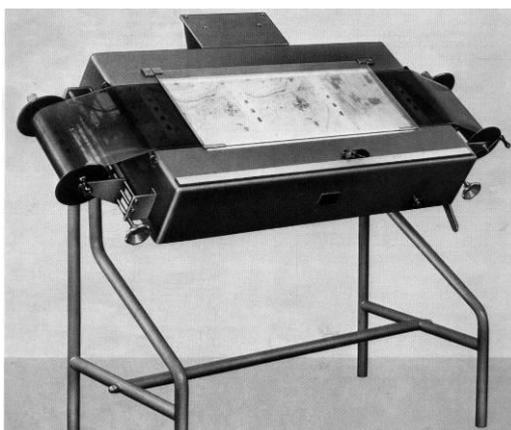


Figura 4.46. Pupitre de exploración.

### **4.1.9. Cámaras Fotográficas Digitales**

Una cámara digital es un dispositivo electrónico usado para capturar y almacenar fotografías en formato digital, en lugar de utilizar medios analógicos como: película fotográfica, en el caso de las cámaras convencionales, o cinta magnética, como muchas cámaras de video.

Tabla 4.4. Componentes básicos de las cámaras convencionales y digitales.  
Modificado de: Mapping Interactivo. 2006.

Componentes	Cámaras convencionales	Cámaras digitales
OPTICA	Lentes	Lentes
SENSOR	Emulsión fotográfica	Detectores de estado sólido (CCD, CMOS)
PROCESADOR	Químico (revelador, fijador)	Computadora (algoritmos de cálculo matemático)
SOPORTE	Película y/o papel	Disco ó tarjeta

#### 4.1.9.1. Fotografía Digital

El término CCD resulta familiar al hablar de uno de los elementos principales de las cámaras fotográficas y de video digitales. En ellas, el CCD corresponde al sensor integrado por diminutas celdas fotoeléctricas que registran la imagen. Posteriormente, la imagen es procesada por la cámara y almacenada en la tarjeta de memoria.

La capacidad de resolución o detalle con que se registran las imágenes depende del número de celdas o detectores del CCD. Al referirnos a una imagen, las celdas son comúnmente llamadas **píxeles** (píxel, acrónimo del inglés picture element, "elemento de imagen o elemento pictórico"). A mayor cantidad de píxeles, mayor será la resolución. Actualmente existen cámaras fotográficas digitales que incorporan CCDs con capacidades de hasta ciento sesenta millones de píxeles (160 mega píxeles), por ejemplo las cámaras Carl Zeiss.

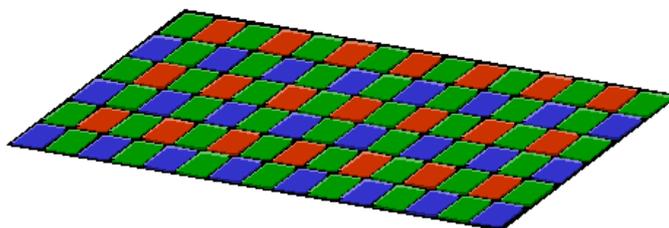


Figura 4.47. Filtro de Bayer utilizado en numerosas cámaras digitales.

Los píxeles del CCD registran tres colores diferentes: rojo, verde y azul (sistema de color "RGB", del inglés **Red**, **Green**, **Blue**). Un grupo de tres píxeles, uno para cada color, conforman un conjunto de celdas fotoeléctricas capaz de captar cualquier color del ambiente que es transformado luego en una imagen. Para conseguir la separación de colores, la mayoría de cámaras con CCD utilizan una máscara de Bayer (Figura 4.47.), que proporciona un filtro para cada conjunto de cuatro píxeles de forma tal que: un píxel registra luz roja, otro la luz azul y dos píxeles se reservan para la luz verde (el ojo humano es más sensible a la luz verde que a los colores rojo o azul). Como ya sabemos, el color del filtro determina la longitud de onda a partir de la cual la luz atravesará la barrera interpuesta. La imagen resultante estará compuesta por la conversión de la luminancia registrada en cada píxel a un nivel digital; cabe aclarar que la resolución en color será menor que la correspondiente a la luminancia debido a la utilización de la máscara de Bayer para poder registrar los canales RGB.

Un CCD (siglas en inglés de Charge-Coupled Device; "Dispositivo de Cargas Eléctricas Interconectadas") (Figura 4.48.) es un circuito integrado que contiene un determinado número de condensadores enlazados o acoplados. En el CCD, la información de cada una de las celdas es enviada a través del chip hacia una de las esquinas del arreglo. Tanto la luz

(fotones) registrada como la corriente generada (conversión de electrones a voltaje) por los CCD son señales de tipo analógicas que luego son convertidas en digitales (discretas) por el circuito de la cámara para conformar finalmente la imagen. De esta forma, la estructura del sensor es simple, pero a costa la necesidad de importantes circuitos adicionales que se encargue del tratamiento de los datos recogidos por él.

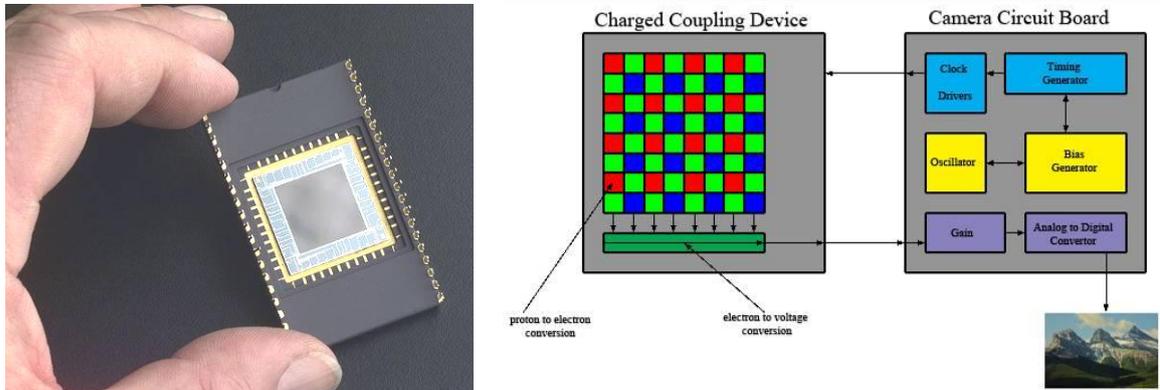


Figura 4.48. Sensor CCD. Tomado de: Enciclopedia Wikipedia. [http://es.wikipedia.org/wiki/CCD\\_\(sensor\)](http://es.wikipedia.org/wiki/CCD_(sensor)).

La alternativa digital a los CCD son los dispositivos CMOS (siglas en inglés de complementary metal oxide semiconductor, "semiconductor de metal-óxido complementario) utilizados en algunas cámaras digitales y en numerosas Webcam. En la actualidad los CCD son mucho más populares en aplicaciones profesionales y en cámaras digitales.

Tanto los CCD como los CMOS están fabricados con materiales semiconductores, concretamente de Metal-Óxido (MOS) y están estructurados en forma de una matriz, con filas y columnas. Funcionan al acumular una carga eléctrica en cada celda (píxel) de dicha matriz y en proporción a la intensidad de la luz que incide localmente sobre ella. A mayor intensidad luminosa, mayor carga acumulada.



Figura 4.49. Sensor de imagen Sony, CMOS.  
Tomado de: <http://www.neoteo.com/ccd-vs-cmos.neo>.

Por el contrario, las celdas de la matriz CMOS son totalmente independientes de sus vecinas. En estos sensores la digitalización (conversión analógico digital) se realiza píxel a píxel dentro del mismo sensor, por lo que solo se requieren circuitos accesorios mucho más sencillos. Cada celda del CMOS contiene varios transistores, los que amplifican y procesan la información recogida. Esta manera de efectuar la lectura de la imagen es más flexible, ya que cada píxel se lee de manera individual. El proceso de fabricación de los CMOS es más sencillo y hace que las cámaras que utilizan esta tecnología resulten más baratas.

Las diferencias entre una y otra tecnología puede ser analizada considerando varios factores los que van desde el precio hasta la eficiencia en el manejo de los datos, pasando por la

capacidad de amplificación, la generación de ruido en la señal, el tamaño del chip, entre otros.

Los sensores CCD se fabrican usando una tecnología desarrollada específicamente para la industria de las cámaras digitales, mientras que los sensores CMOS se basan en una tecnología estándar ampliamente utilizada en los chips de memoria como los que integran una computadora personal.

#### 4.1.9.2. Funcionamiento de una Cámara Digital

Al igual que las celdas fotovoltaicas, los detectores CCD se basan en el **efecto fotoeléctrico** que es la conversión espontánea que realizan algunos materiales de la luz recibida en corriente eléctrica. La sensibilidad del detector CCD depende de la **eficiencia cuántica del chip**, esto es, la cantidad de fotones que deben incidir sobre cada detector para producir una corriente eléctrica. El número de electrones producido es proporcional a la cantidad de luz recibida, similar a lo que ocurre en la fotografía convencional solo que en esta última los fotones activan los haluros de plata para su conversión a plata metálica (proceso fotoquímico). Al final de cada exposición, los electrones producidos son transferidos de cada detector individual (fotositio) por una variación cíclica de un potencial eléctrico aplicada sobre bandas de semiconductores horizontales y aisladas entre sí por una capa de  $\text{SiO}_2$ . De este modo el CCD es leído línea a línea, aunque existen otros numerosos arreglos diferentes de detectores.

En todos los CCD el ruido electrónico aumenta fuertemente con la temperatura y suele duplicarse cada 6 u 8 °C.

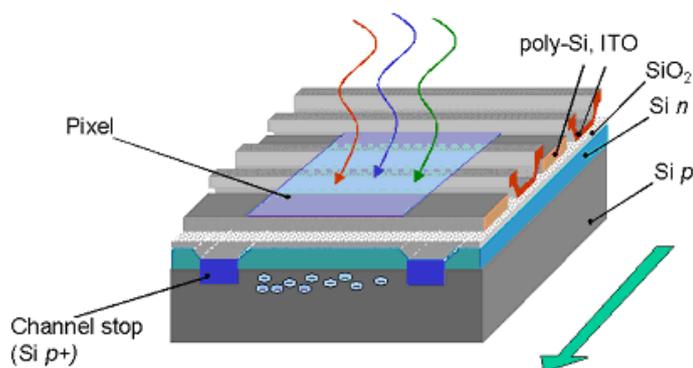


Figura 4.50. Versión simplificada en 3D de un sensor CCD.  
Tomado de: Enciclopedia Wikipedia.

#### 4.1.9.3. Resolución de la Imagen Fotográfica

La resolución de una cámara fotográfica digital está limitada por el sensor de la cámara (generalmente un CCD o un CMOS) que responde a las intensidades lumínicas, substituyendo el proceso fotoquímico de la película fotográfica tradicional. Como ya se dijera, el sensor está compuesto por una matriz de celdas o **píxeles**, y se utiliza un algoritmo de mosaikado e interpolación para unir los registros en cada color, y por píxel, en una imagen única presentada en el sistema de color RGB.

Dependiendo del número de bits del conversor analógico - digital existente en el sensor, obtendremos una imagen con mayor o menor gama de colores. Por ejemplo, si se utilizase un solo bit tendríamos valores de 0 y 1, y sólo podríamos representar presencia o ausencia

de luz, lo que supondría una imagen en dos tonos puros: blanco y negro. Si se utilizase ocho bits por píxel tendríamos 256 tonos de cada color y una composición de 16.777.216 de colores en el sistema RGB.

La cantidad de píxeles resultante en la imagen determina su tamaño en memoria. Por ejemplo, una imagen de 640 por 480 celdas tendrá en total 307.200 píxeles, o aproximadamente 307 kilo píxeles; una imagen de 3.872 por 2.592 celdas tendrá 10.036.224 píxeles, o aproximadamente 10 mega píxeles.

En algunos casos, una cantidad excesiva de celdas pueden incluso conducir a una disminución de la calidad de la imagen, pues cada detector del píxel es tan pequeño que recoge muy pocos fotones, disminuyendo de esta manera el cociente señal-ruido. Esta disminución conduce a cuadros ruidosos, escaso contraste y, por ende, a imágenes de pobre calidad.

Por otra parte, el tamaño físico del detector es también muy importante ya que se relaciona directamente con la sensibilidad a la luz; esto es análogo a lo que ocurre con la película fotográfica de las cámaras convencionales. Una película con mayor sensibilidad tiene los cristales de haluros de plata más grandes, pero esto representa una pérdida de resolución.

De la misma forma, un detector de 12 micras tiene un 77 % más de sensibilidad a la luz que un elemento de 9 micras (Figura 4.51.), pero se pierde resolución espacial. De todas formas, se ha de tener en cuenta que un detector de mayor tamaño en combinación con una resolución espectral de 12 bit produce muy buenos resultados incluso con malas condiciones meteorológicas.

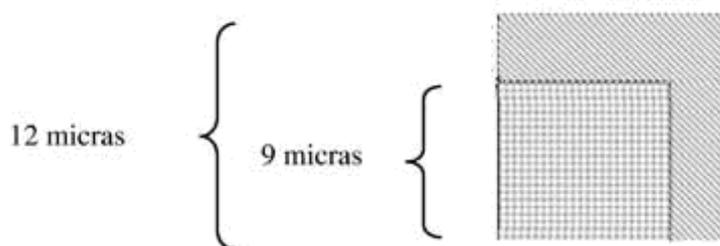


Figura 4.51. Influencia del tamaño del detector.

#### 4.1.9.4. Métodos para Capturar las Imágenes

Desde la introducción al mercado de los primeros **respaldos** digitales, ya se conocían tres métodos principales de capturar la imagen fotográfica, los que dependen de la configuración de hardware del sensor y de los filtros de color utilizados.

El primer método es denominado de **disparo único**, ya que el sensor de la cámara fotográfica es expuesto a la luz, que pasa a través de la lente, una única vez en cada toma fotográfica. Los sistemas de disparo único tienen dos opciones, utilizan un CCD con un filtro de Bayer, o tres sensores independientes (uno por cada color primario aditivo: rojo, verde, y azul) que son expuestos a la luz mediante un sistema óptico de separación.

En el segundo método, denominado de **multidisparo**, el sensor es expuesto a la luz en una secuencia de tres o más aperturas del obturador de la lente. Hay varias opciones en la aplicación de esta técnica. La original, y más conocida, utiliza un único CCD con tres filtros - en el sistema RGB - colocados delante del sensor para obtener la información aditiva del color. La segunda opción de multidisparo utiliza un único CCD con un filtro de Bayer pero,

moviendo la posición física del sensor en el plano focal de la lente, compone una imagen de mayor resolución ya que cada celda tiene el registro en los tres colores.

La tercera opción, llamada de **exploración**, combina los otros dos métodos pero sin la utilización de un filtro de Bayer en el sensor. El método de exploración debe su nombre a que el sensor se mueve a través del plano focal de la lente como en un scanner de escritorio. El sistema utiliza de una a tres líneas de fotosensores, una por cada color. En algunos casos, la exploración es lograda moviendo la cámara fotográfica completa; este tipo de cámara ofrece imágenes de resolución total muy alta.

#### 4.1.10. Tipos de Cámaras Aéreas Digitales

Las actuales cámaras aéreas digitales ofrecen dos soluciones diferentes: la lineal y la matricial (Figura 4.52.).

Las cámaras aéreas de barrido por línea registran el terreno a medida que avanza el avión y lo hacen simultáneamente en diferentes canales radiométricos - tres pancromáticos o de tres a más multiespectrales -; el barrido se realiza en forma similar a los barredores de empuje satelitales. Tienen una única lente y un plano focal. Ejemplo de este tipo de cámaras es la ADS-40 de LEICA (Figura 4.53.).

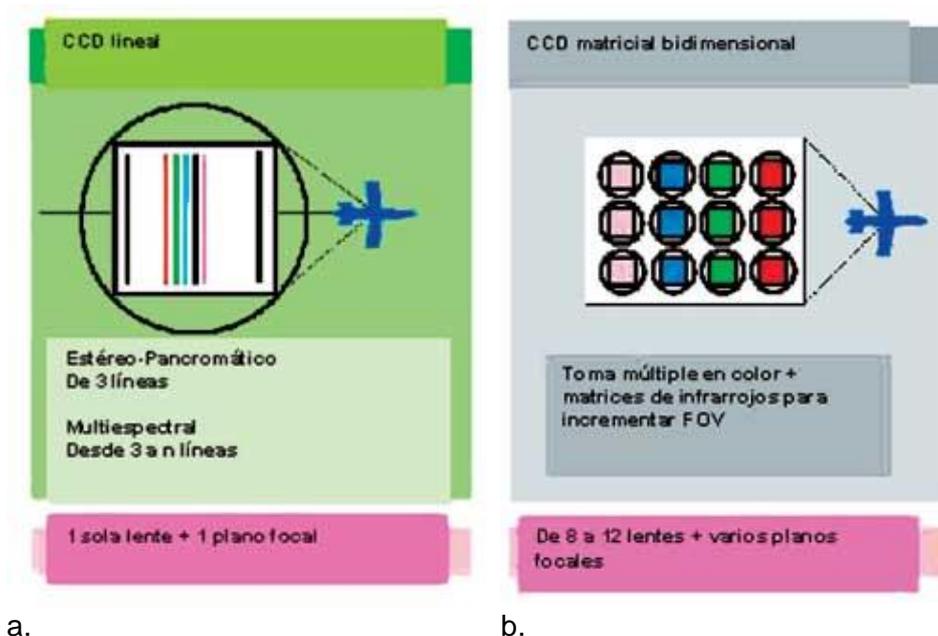


Figura 4.52. CCD: a, lineal y b, matricial bidimensional. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

Las cámaras matriciales toman imágenes al modo de las cámaras convencionales, tienen varios objetivos que disparan simultáneamente, unos en pancromático (rojo, verde y azul) y otros en infrarrojo. Cuentan con varios planos focales y funden las imágenes en una única.

Estas cámaras matriciales pueden constar en la actualidad de  $nK$  por  $nK$  elementos sensoriales (fotodetectores que se corresponden con los píxeles de la imagen) siendo  $K$  1024 elementos y  $n$  puede oscilar de 1 a 9. Las configuraciones más usuales utilizan un  $n = 3$  ó  $4$  (para el caso de  $n = 3$ , la resolución es de 9 Mega píxeles). Están disponibles en pancromático, color ó falso color.

Las cámaras matriciales son muy estables y de geometría conocida ya trabajan con una proyección central definida. El principal inconveniente es la transferencia de los datos, con velocidades adecuadas y sin pérdidas, desde el sensor de estado sólido (CCD) hasta el medio de almacenamiento.

Las cámaras matriciales se suelen utilizar de forma modular, de a dos o de a cuatro, para mejorar lo ofrecido por un solo instrumento. Así se incrementa la resolución espectral, el ángulo de campo y la resolución espacial. Se acoplan a las monturas de las cámaras aéreas analógicas y tienen un tiempo de exposición entre 1 y 3.3 microsegundos con 12 bits de resolución. Suelen llevar también una cámara de video centrada en la montura. La imagen pancromática compuesta a partir de las 4 lentes convergentes se consigue mediante un proceso de muestreo y rectificación. Ejemplo de este sistema es la cámara DMC (Digital Metrical Camera) de Zeiss / Intergraph Imaging (Figura 4.63.).

#### 4.1.10.1. Principios de las cámaras digitales de barrido por línea

El sensor aerotransportado LEICA ADS 40 (Figura 4.53.) puede ser considerado como el representante de las cámaras digitales de barrido lineal.



Figura 4.53. Sensor ADS 40 de LEICA. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

##### 4.1.10.1.1. La cámara ADS 40 de LEICA

###### Características de la cámara ADS

Entre sus características sobresalientes se pueden mencionar: ocho sensores CCD en línea, todos situados en el plano focal, diseñados para requerimientos fotogramétricos y para teledetección a baja altura. De los ocho sensores: tres son pancromáticos, otros tres también pancromáticos pero que registran en los colores rojo, verde y azul, uno en el infrarrojo medio y el último en el infrarrojo térmico.

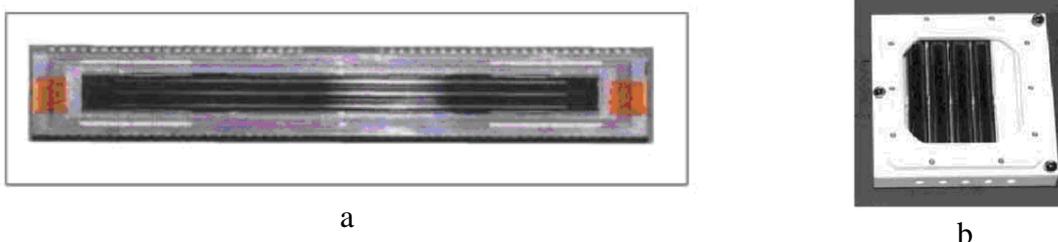


Figura 4.54. a: Configuración del sensor CCD; b: Disposición del CCD en el plano focal. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

Cada uno de los CCD (Figura 4.54.a.) tiene dos líneas de 12.000 fotodetectores; el tamaño de cada detector es de 6,5 micrones. Tiene una focal de 62,5 mm y el ángulo del campo de vista (FOV: siglas en inglés de Field Of View) de 52°. Los sensores están sustentados en el plano focal con la disposición que se ve en la Figura 4.54.b. La estructura electrónica del sensor está formada por dos arreglos escalonados desfasados medio detector (Figura 4.55.).

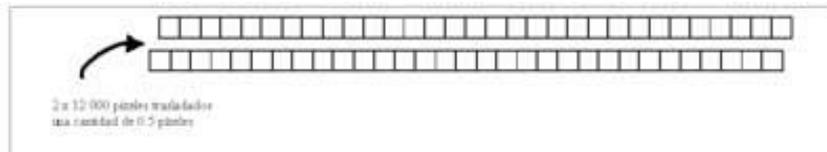


Figura 4.55. Disposición geométrica de las dos filas de fotodetectores en cada uno de los sensores pancromáticos. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

### El registro por barrido simultáneo

La imagen se registra por barrido simultáneo en tres posiciones correspondientes a la misma toma, una hacia atrás otra sobre el nadir y la tercera hacia delante. Posteriormente, durante el pos-proceso los tres barridos se integrarán para formar una sola imagen (Figura 4.56.).

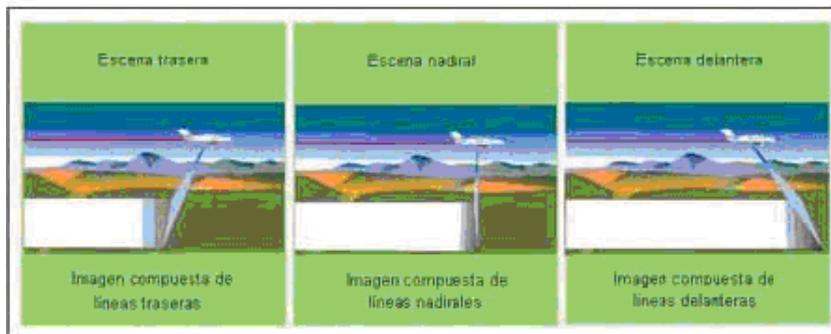


Figura 4.56. Tres direcciones de barrido en una misma posición de registro. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

En la Figura 4.57. puede verse que, para una misma localización del sensor, por un lado, se registra una porción diferente del terreno - esto es análogo al área ganada por una fotografía en los levantamientos con cámaras convencionales -; mientras que, por otro lado, el mismo sector del terreno es registrado por los sensores con diferente ángulo de visión.

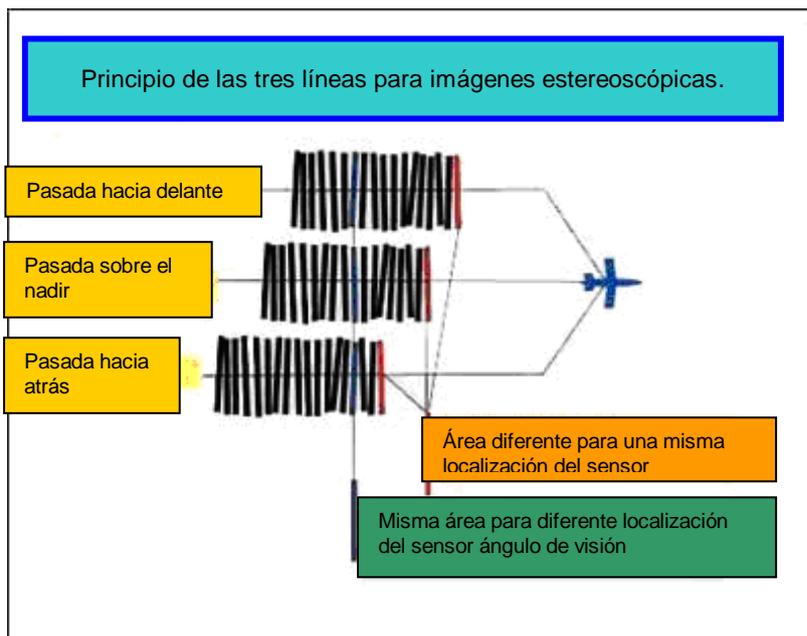


Figura 4.57. Obtención de imágenes estereoscópicas.  
Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

El sistema, además de registrar imágenes en diferentes canales radiométricos, permite el cálculo de las paralajes para cada píxel ya que las mismas porciones de terreno son vistas desde tres diferentes perspectivas, con ángulos perfectamente conocidos.

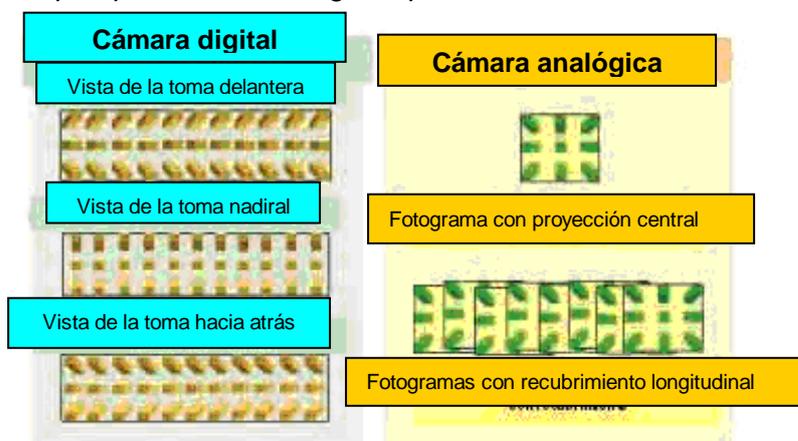


Figura 4.58. Comparación entre cámara digital de línea y cámara analógica.  
Modificado de: Mapping Interactivo. 2006.

En la Figura 4.58. se pueden observar gráficamente las diferencias y similitudes de la proyección central en el sensor digital y en la cámara analógica, ambas aerotransportadas. Con la cámara digital se obtienen tres diferentes pasadas sobre zonas en común para hacer posible su correlación. En el caso de la cámara analógica, los fotogramas son registrados con superposiciones longitudinales para obtener la vista de los mismos sitios pero desde centros de proyección diferentes (punto de disparo).

Ya que el objetivo de la lente ha de estar abierto permanentemente para el registro de la imagen, las características de esta estarán influenciadas por las actitudes (rotaciones sobre los ejes x, y, z) de la aeronave durante cada pasada. De esta manera, las dimensiones y forma del IFOV (Instantaneous Field Of View: siglas en inglés de campo instantáneo de vista)

quedarán definidas en función de las velocidades de: el avión, el obturador y el sistema de grabación y, por otra parte, del equipamiento disponible para la corrección de las mencionadas actitudes de la aeronave.

Los levantamientos con cámaras digitales de barrido lineal requieren de un sistema GPS-INS a bordo, el que es totalmente dependiente de estaciones fijas en tierra; debe existir al menos una de ellas a no más de 30 km. El GPS deberá recibir datos desde la estación terrena cada 0,5 a 1 seg. Se requiere calcular la excentricidad del GPS en la aeronave con respecto a la antena terrena. También se hace necesario desarrollar nuevo software e implementar nuevos procedimientos y rutinas de trabajo.

#### 4.1.10.2. Principios de las cámaras digitales matriciales

A diferencia de las cámaras digitales de registro lineal que obtienen la imagen en forma continua, las de formato matricial lo hacen de forma instantánea y sobre un modulo de detectores con arreglo matricial. Estas cámaras combinan varios objetivos en su plano focal, produciendo imágenes parciales que luego son integradas en una sola durante el pos-proceso (Figura 4.59.).

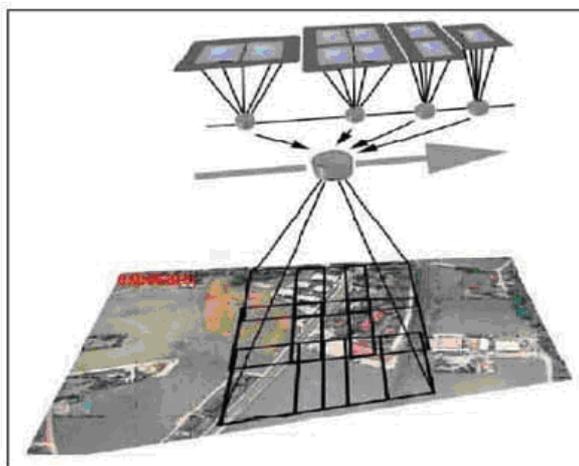


Figura 4.59. Registro instantáneo en diferentes canales radiométricos.  
Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

En el panorama comercial se destacan dos productos: la Vexcel Ultracam de Inpho (Figura 4.60.) y la Z/I DMC de Zeiss / Intergraph Imaging (Figura 4.63.).

##### 4.1.10.2.1. La Vexcel Ultracam de Inpho

###### Características y funcionamiento de la Ultracam

El sensor de la cámara Ultracam está conformado por un total de 11.500 por 7.500 detectores con la siguiente configuración: cuatro arreglos matriciales con un objetivo pancromático cada uno y otras cuatro matrices con objetivos multispectrales en el rojo, verde, azul e infrarrojo cercano (Figura 4.60.); todas las matrices tienen 4.000 por 2.672 fotodetectores. La distancia focal de los objetivos es de 100 mm y su luminosidad de  $f: 1,56$ . Cada fotodetector tiene un tamaño de 9 micras de lado y un campo de visión (FOV) de  $55^\circ$  por  $37^\circ$ .



Figura 4.60. Cámara fotogramétrica digital matricial Vexcel Ultracam.  
Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

La fotografía digital final se obtiene del mosaico generado a partir de las imágenes obtenidas por los citados módulos pancromáticos y del infrarrojo; posteriormente se pueden generar combinaciones a color verdadero o falso, mediante la combinación de los mosaicos pancromáticos - del sistema R, G, B o blanco y negro – entre ellos o con el canal infrarrojo.

Los pasos que permiten la formación de la imagen completa se describen en los párrafos que siguen.

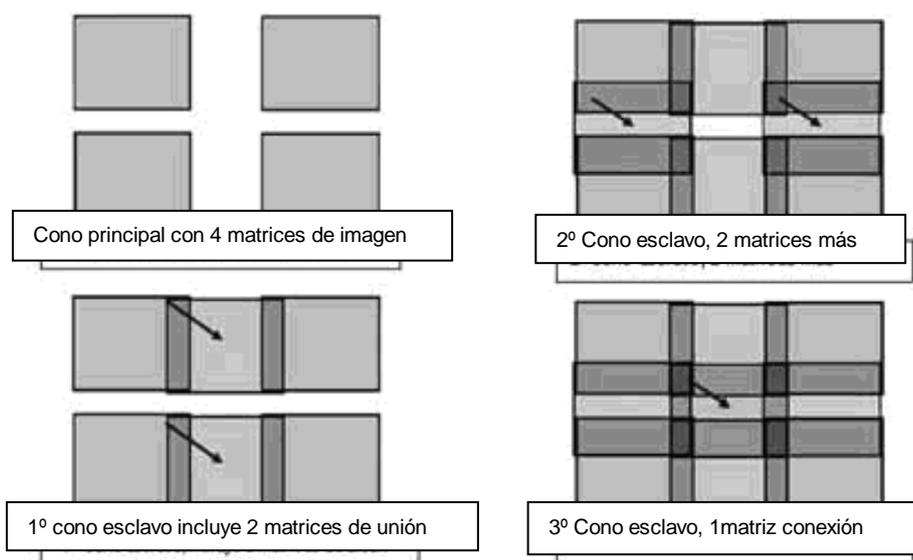


Figura 4.61. Secuencia del registro de las imágenes parciales.  
Modificado de: Mapping Interactivo. 2006.

En primer lugar funciona el cono principal ó maestro con cuatro matrices de imagen (Figura 4.61.). En una segunda instancia, el primer cono “esclavo” introduce dos imágenes en el centro de los primeros pares, creando cuatro áreas de solape. Durante el tercer paso, el segundo cono “esclavo” registra otras dos imágenes para vincular longitudinalmente los primeros pares creando otras cuatro áreas de ensamble y, por último, el tercer cono “esclavo” toma una última imagen uniendo y solapando todas las anteriores.

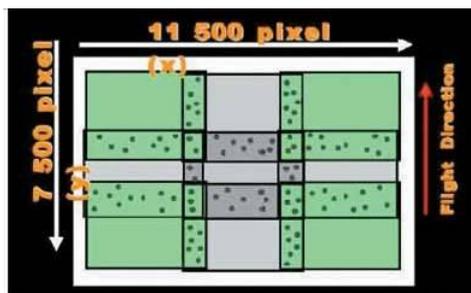


Figura 4.62. Imagen final con las áreas de solapamiento. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

La imagen final cuenta con nueve matrices de imagen con áreas de recubrimiento (Figura 4.62.). En dichas zonas, los puntos comunes sirven para ensamblar (pos-proceso) las imágenes parciales en única combinando información en diferentes canales radiométricos.

#### 4.1.10.2.2. La DMC de Zeiss / Intergraph Imaging

En la Figura 4.63. se presenta la Cámara Fotogramétrica Digital (DMC: Digital Metrical Camera), su ubicación en la aeronave y la presencia del resto de los componentes del sistema necesarios para la obtención de las fotografías aéreas digitales.

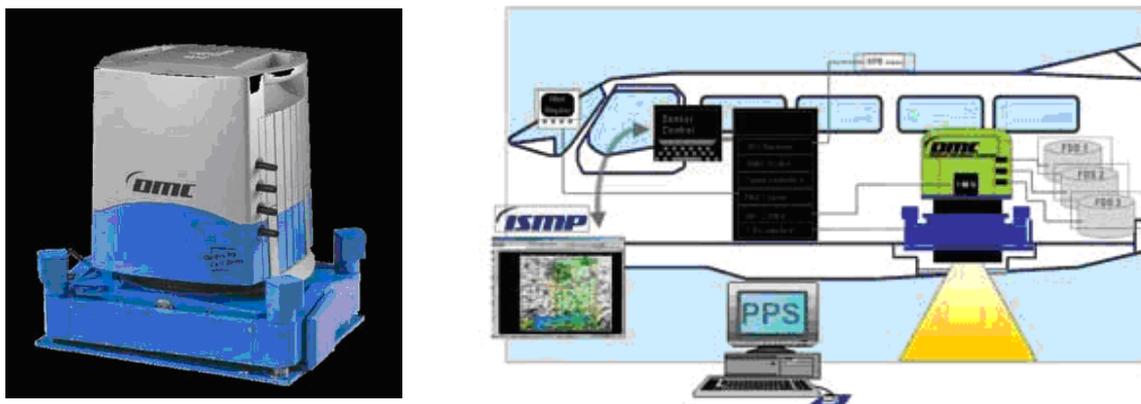


Figura 4.63. La DMC y su ubicación relativa en la aeronave. Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

La cámara debe ser ubicada en la posición tradicional - sobre una perforación en el fuselaje - y conectada a los diferentes elementos que componen el sistema de registro, control, manejo y almacenamiento digital (Figura 4.63.). El equipamiento principal para la obtención de fotografías aéreas digitales está integrado por:

- La cámara DMC;
- El centro de control del sistema (IMU: Inertial Measure Unit, por sus siglas en inglés);
- Las unidades de almacenamiento masivo; y
- La interfase para navegación.

#### Características de la DMC

En la Tabla 4.5. se presentan las características técnicas principales de la DMC.

Tabla 4.5. Características técnicas de la DMC de Zeiss / Intergraph.

Formato de la imagen	13.824 por 7.680 píxeles
Tamaño del detector	12 micras
Distancia focal	120 mm
Sistema GPS / INS	Integrado en el sistema
Resolución radiométrica	12 bit / canal
Resolución espectral	8 canales: Pancromático, Azul, Verde, Rojo e IR cercano
Compensación FMC	Electrónica TDI (Time Delayed Integrated)
Almacenamiento en vuelo	2.200 imágenes
Campo de visión (FOV)	42° en sentido longitudinal y 89.3° en sentido transversal a la línea de vuelo
Obturación Apertura diafragma	1/50 - 1/300 seg. 1/4 - 1/22

El centro de control del sistema

El centro de control comanda, maneja y controla todas las operaciones que realiza el sistema para la adquisición de las fotografías aéreas digitales.

Un dispositivo incorporado al sistema que resulta de gran importancia es el Compensador del Movimiento Frontal o FMC (Forward Motion Compensation) que opera mediante la Integración a Tiempo de Retardo o TDI (Time Delayed Integration). Este permite mejorar las imágenes al compensar el efecto que provoca el cabeceo del avión sobre la definición de los objetos fotografiados (Figura 4.64.). El sistema compensador FMC convierte los límites borrosos de los objetos en bordes contrastados utilizando la técnica de captación previa y registro real de la imagen integrada con un tiempo de retardo (Figura 4.65.).

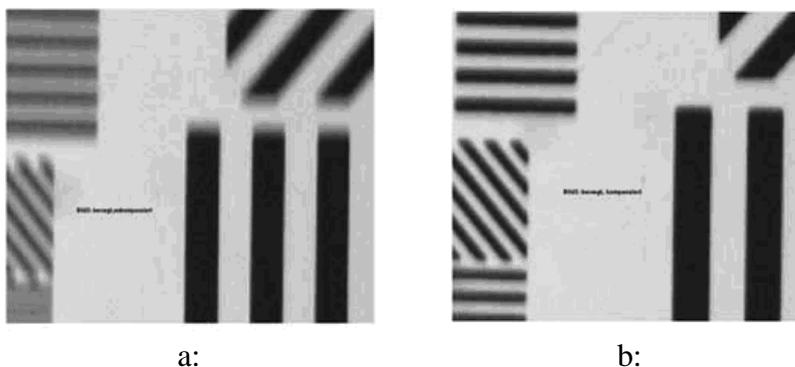


Figura 4.64. a: Objeto movido sin compensación; b: objeto compensado.  
Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

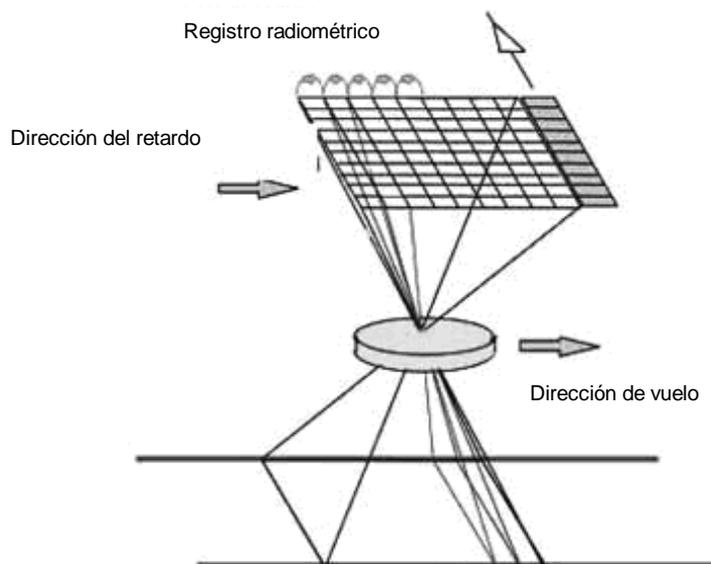


Figura 4.65. Esquema de funcionamiento del sistema FMC.  
Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

Las unidades de almacenamiento masivo de datos en vuelo

Uno de los principales inconvenientes de esta nueva tecnología, es el enorme tamaño de los archivos de imagen generados durante las tomas aéreas digitales; se debe tener en cuenta que cada imagen tiene en el orden de 14.000 por 8.000 píxeles y que un mismo sector se registran en diferentes canales radiométricos.

Por tal motivo se debe contar con sistemas de almacenamiento rápidos, eficaces y manejables, para su fácil manipulación y transporte a las oficinas donde se realizarán los tratamientos posteriores de las imágenes obtenidas en vuelo.

El sistema de la cámara DMC, por ejemplo, incluye tres Unidades de Almacenamiento de Datos en Vuelo (FDS: Flight Data Storage devices). (Figura 4.66.).

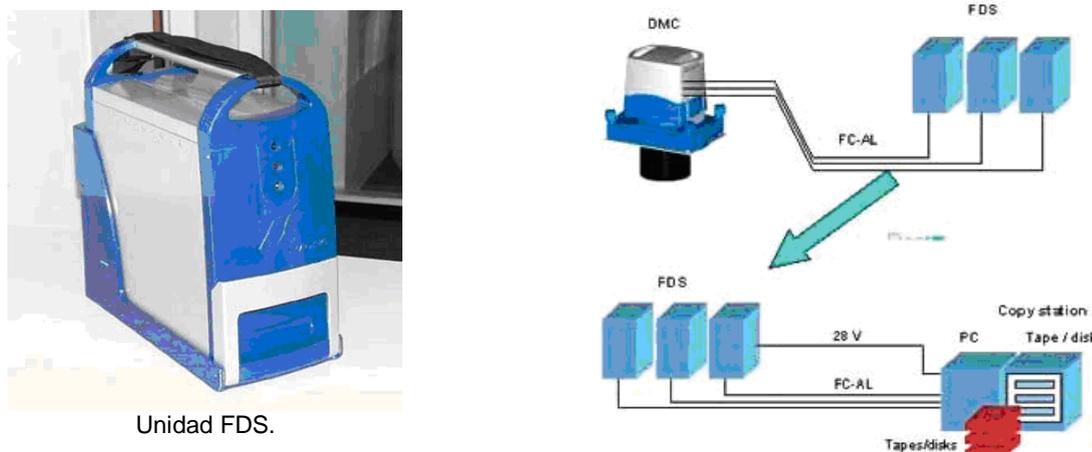


Figura 4.66. Unidades FDS, su integración con la cámara y la estación de pos-proceso.  
Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

Cada unidad FDS está presurizada, es totalmente hermética y se pueden interconectar entre ellos y con el sensor de la cámara por puertos paralelos y mediante fibra óptica. La velocidad

de transmisión de datos es de 136 MB / seg. La capacidad de almacenamiento total del sistema es de 840 GB, lo que equivale a unas 2240 imágenes, cada una de ellas en pancromático, color (RGB) e infrarrojo.

En la Figura 4.66. se puede observar la conexión entre la cámara y las unidades FDS a través de cables de fibra óptica. Una vez en gabinete, las tres unidades de almacenamiento son conectadas a un PC que mediante una estación de copia con el objeto de pasar los datos a cinta o a disco.

La Estación de Pos-proceso (PPS: Post Process Station) está dotada de un disco gran capacidad (3,6 TB) y de acceso rápido; por otra parte, mediante dos algoritmos: Radiométrico y el Geométrico se calculan todos los parámetros necesarios para formar las imágenes fotogramétricas.

### La interfase para navegación

Con la internase para la navegación, el piloto, navegante y fotógrafo pueden controlar la realización del vuelo en tiempo real gracias a un software que despliega sobre una pantalla la posición de la aeronave sobre la ruta planificada, los centros de imagen, el área cubierta por cada fotograma y el recubrimiento. La posición de la cámara en cada instante es entregada en línea por el sistema GPS, el que además provee las coordenadas de los puntos de toma fotográfica. La ubicación del sistema GPS respecto a la cámara (vectores de situación) debe ser perfectamente conocida para poder determinar con precisión el punto de registro del fotograma (análogo al punto principal de la fotografía convencional).

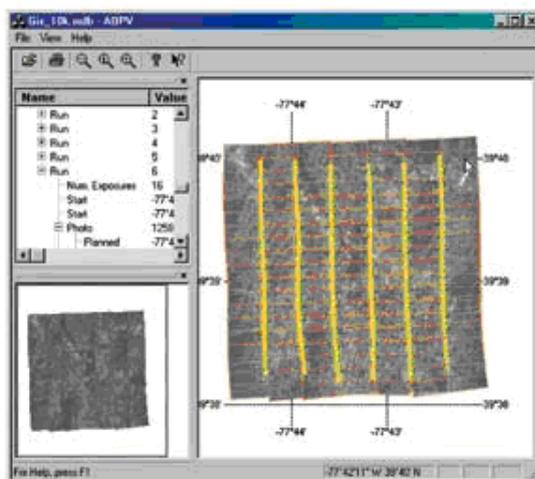


Figura 4.67. Fotomosaico digital obtenido luego del levantamiento.  
Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

### Procesado geométrico y generación de la imagen final

El objetivo de la DMC está compuesto por ocho conos; de los cuales, cuatro son pancromáticos y cubren diferentes zonas de la matriz rectangular de la imagen. Esas zonas tienen solape entre ellas y durante el pos-proceso son unificadas para obtener la imagen definitiva. Los cuatro conos pancromáticos ofrecen una alta resolución geométrica (12 micras) proveyendo el detalle de la imagen final. El cuerpo de la cámara lleva montada una cámara de vídeo que ayuda a la navegación y provee información adicional.

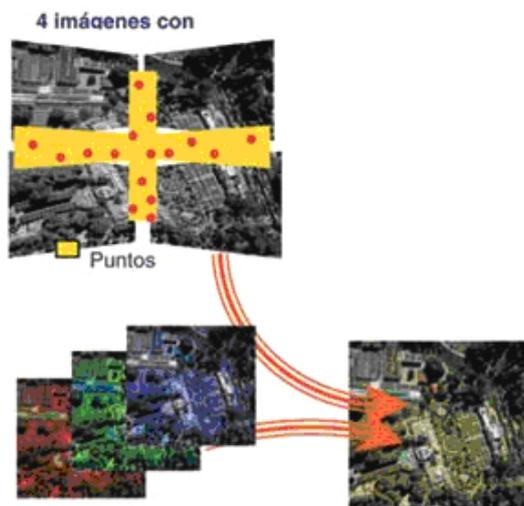


Figura 4.68. Integración de la imagen final a partir de los datos provistos por los ocho conos.  
Tomado de: Mapping Interactivo. 2006.

De los cuatro conos restantes, tres aportan los colores primarios (azul, verde y rojo) y el cuarto el infrarrojo. Cada uno de estos conos obtiene una imagen de la totalidad del área cubierta por los cuatro conos pancromáticos. La resolución geométrica o espacial es mucho menor (40 micras) pero aportan la componente de color y la información infrarroja que permite la generación de las composiciones color verdadero y falso color.

En la Figura 4.68. se muestra la integración de todos los canales radiométricos para la formación de la imagen final en el pos-proceso. En una primera instancia se produce la formación del mosaico de imágenes pancromáticas, obtenido a partir de las cuatro tomas independientes; las mismas son unidas mediante un ajuste robusto con puntos de enlace, chequeo y control aplicando los parámetros de calibración necesarios para proyectar las sub-imágenes a una perspectiva central adecuada.

En una segunda instancia se procede a la generación de las imágenes en color. Para las fotografías de alta resolución se combinará la imagen pancromática con los canales de color primario y/o el infrarrojo; por el contrario, si solo se desea la composición color se utilizarán los canales de colores primario y el infrarrojo.

Si se desea una fotografía en color verdadero se combinarán los tres canales de colores primarios. Para las fotografías en falso color, se combinarán dos canales de color primario y el infrarrojo.

#### 4.1.10.3. Elección de la cámara digital más adecuada

Para elegir un determinado equipo es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Mayor resolución espacial, espectral y radiométrica
- Mayor cobertura de terreno para una misma resolución espacial y altura de vuelo
- Sistema GPS integrado
- Mayor robustez estructural
- Sistema de almacenamiento transportable e intercambiable y de gran capacidad
- Inclusión de una cámara de video para control del vuelo
- Compatibilidad con cámaras analógicas
- Sistema de suspensión con giro estabilizado

**4.1.10.4. Comparación entre cámaras digitales y analógicas**

Tabla 4.6. Comparación entre cámaras digitales y analógicas.

Aspectos y factores	Cámaras	
	Digitales	Analógicas
Conocimiento y experiencia con la tecnología	Productos nuevos y en desarrollo	Productos muy conocidos y probados
Resolución espacial (para una escala de detalle 1:5000)	Un detector de 12 micras tiene un resolución en el terreno de aproximadamente 6 cm	Una película con más de 100 líneas/mm resuelve objetos de 2.5 cm
Resolución espectral	Registro simultáneo de datos multiespectrales –es posible registrar hasta infrarrojo termal	Se requieren cámaras independientes con película de diferente sensibilidad – en infrarrojo se llega hasta 1.2 μ
Resolución radiométrica	12 bits	Depende de la resolución del escaneado
Productos	Blanco y negro, color y falso color	Ídem
Luminancia	Es posible medir la intensidad absoluta (cantidad de fotones) por la linealidad de la respuesta de los detectores y su conversión digital	Solo iluminación relativa en base a los tonos de la imagen fotográfica registrados por los haluros de plata de la película
Almacenamiento	Gran capacidad con bajo requerimiento en espacio físico	Se requiere mayor espacio físico para el almacenamiento de la película y de las copias fotográficas
Procesador fotográfico	Por computadora (cálculo matemático)	Químico (revelado, fijado, lavado y secado)
Sensor	Detector de estado sólido (CCDy CMOS)	Emulsión fotográfica
Soporte	Disco o tarjeta electrónica	Película o papel; excepcionalmente placa de vidrio
Campo de visión (FOV)	Menor rango: 42° x 89.3° (DMC de Zeiss), 55° x 37° (Ultram de Vexel) y 52° (ADS de Leica)	Mayor rango: de 60°, 90° y 120° (objetivo normal, gran angular o súper gran angular, respectivamente)
Velocidad de obturación	Menor: de 1/50 a 1/300 seg.	Mayor: de 1/50 a 1/1000 seg.
Apertura del diafragma	De f/4 a f/22	Ídem
Control de movimiento de la aeronave (cabeceo y ladeo)	Electrónico	Mecánico (sistema de suspensión)
Estabilidad del material	Muy estable (no se deforma por efectos externos)	Afectado por condiciones de temperatura y humedad
Durabilidad del material	Menor duración pero bajo costo en la duplicación	Larga duración pero mayores costos para la duplicación
Costos de digitalización	No requerido – formato nativo	Se requiere la utilización de equipamiento adicional (escáner) para pasar a formato digital
Apoyo terrestre	Reducido por el registro de puntos con el sistema GPS - sistema inercial que suministran X,Y,Z del punto de disparo así como los tres giros para las orientaciones (kapa, fi y omega)	Se requiere mayor apoyo de puntos de control para la aerotriangulación y posterior restitución
Robustez	Son menos robustas y más frágiles a los golpes	Son más robustas - tienen pocos componentes y son menos frágiles -
Seguimiento del levantamiento aerofotográfico	En tiempo real	Se requiere disponer de las fotografías para evaluar el vuelo
Precio (sin accesorios)	Entre € 600.000 y 800.000	En el orden de € 300.000

## 5. FOTOGRAMETRÍA ELEMENTAL

### 5.1. Geometría de las fotografías aéreas

#### 5.1.1. Proyección central y ortogonal, comparación entre mapas y fotografías aéreas

**Proyección Central:** definida por un punto propio "O", llamado centro de perspectiva o centro de proyección, en el que convergen todos los rayos proyectados desde una serie de puntos de un plano (vértices A, B, C y D de la Figura 5.1.a.).

**Proyección Ortogonal:** se hace tomando como centro de proyección a un punto impropio, es decir el pie de la perpendicular bajada desde un punto de una recta a un plano (Figura 5.1.b.).

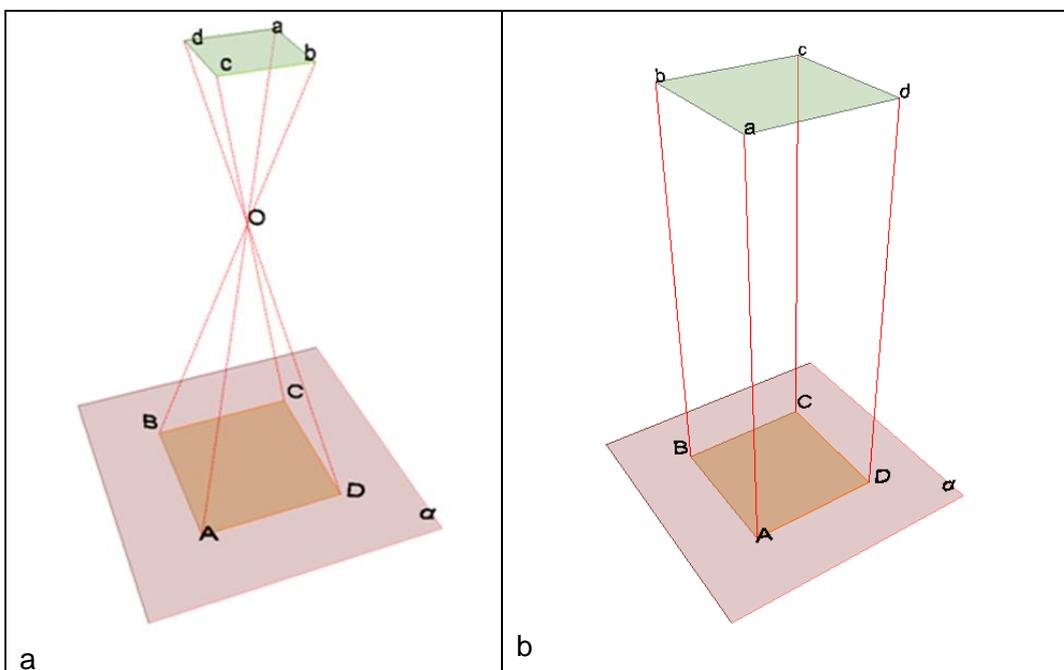


Figura 5.1. Proyección central (a) Vs. proyección ortogonal (b).

Tabla 5.1. Comparación entre mapas y fotografías aéreas.

MAPA	FOTOGRAFÍA AÉREA
Representación geométrica correcta.	Representación geométrica no correcta debido a: desplazamientos por relieve, inclinación y distorsión de la lente.
Proyección Ortogonal.	Proyección Central.
Todos los objetos, visibles y no visibles, son representables en la cartografía.	Sólo se observan los objetos visibles.
Es una representación abstracta, donde la leyenda es indispensable.	Es una representación real, donde la leyenda reduce el valor.
Es necesario dibujarlo nuevamente para cambiar la escala, siendo ésta uniforme en toda la superficie representada.	Mediante técnicas fotográficas se puede ampliar o reducir la escala dentro de ciertos límites (la escala varía fuertemente en terrenos montañosos).

### 5.1.2. Elementos de una fotografía aérea

**Punto Nadir:** es la intersección de la vertical que pasa por el centro de proyección con el plano del negativo. Se indica con **N** en el terreno y **n** en la fotografía.

**Punto Principal:** es la proyección ortogonal del centro de proyección sobre el plano de la fotografía. **P** en el terreno y **p** en la foto.

**Isocentro:** es el punto en que la bisectriz del ángulo determinado por la perpendicular al plano del negativo y la vertical que pasan por el centro de proyección, cortan al plano del negativo. **I** en el terreno e **i** en la foto.

**Distancia Principal:** es la distancia del centro de proyección al plano del negativo, indicada con **c** en la figura.

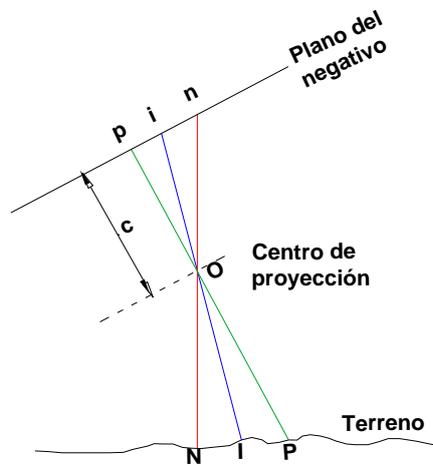


Figura 5.2. Elementos de una fotografía aérea.

### 5.1.3. Escala

a) De Mapas: es la relación que existe entre una distancia medida en el mapa y su correspondiente en el terreno. Ej. distancia en el mapa: 32 mm; distancia en el terreno: 640 m.

$$\text{Escala} = \frac{1}{E} = \frac{32 \text{ mm}}{640 \text{ m}} = \frac{1}{20.000}$$

b) De fotografías aéreas: es la relación existente entre una distancia **na** medida en la fotografía y su correspondiente distancia **NA** en el terreno.

$$\frac{1}{E} = \frac{na}{NA}$$

La escala en fotografías aéreas exactamente verticales es constante para un mismo plano horizontal.

Comparando los triángulos semejantes **Ona** y **ONA** se tiene:

$$\frac{1}{E} = \frac{na}{NA} = \frac{c}{z}$$

Podemos definir también la escala aérea, siendo ésta la relación entre  $c$  (distancia principal) y  $Z$  (altura de vuelo sobre el terreno).

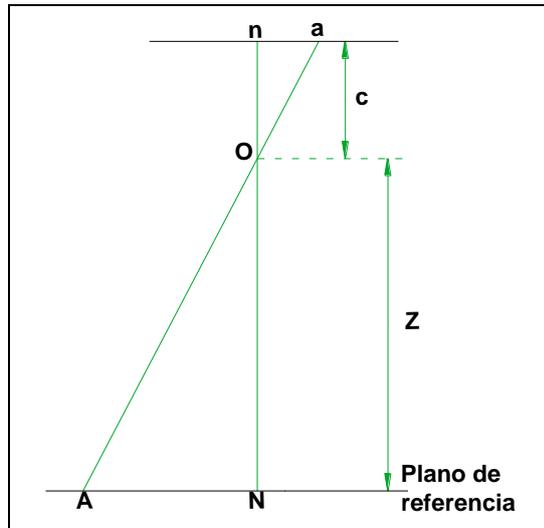


Figura 5.3. Parámetros de la escala de una fotografía aérea.

$$\frac{1}{E} = \frac{C}{Z} = \frac{21 \text{ cm.}}{630 \text{ m.}} = \frac{1}{30.000}$$

#### 5.1.4. Desplazamiento debido al relieve

El Desplazamiento debido al relieve (para un plano de referencia) es la distancia entre la posición de un punto (a) en la fotografía y la posición que éste tendría en la misma fotografía si el punto estuviese sobre el plano de referencia (a1).



$$Z_n (r - \Delta r) = CR' \quad (2)$$

de (1) y (2):

$$r (Z_n - \Delta Z) = CR'$$

$$Z_n (r - \Delta r) = CR'$$

$$r (Z_n - \Delta Z) = (r - \Delta r) Z_n$$

$$r \cdot Z_n - r \cdot \Delta Z = r \cdot Z_n - \Delta r \cdot Z_n$$

$$- r \cdot \Delta Z = - \Delta r \cdot Z_n$$

$$r \cdot \Delta Z = \Delta r \cdot Z_n$$

$$\Delta r = \frac{\Delta Z \cdot r}{Z_n}$$

#### 5.1.4.1. Propiedades del desplazamiento debido al relieve

- a) Crece radialmente a partir del punto nadir y proporcionalmente a la distancia  $r$
- b) Es directamente proporcional a la diferencia de altura
- c) Es inversamente proporcional a la altura de vuelo

#### 5.1.5. Desplazamiento debido a la inclinación de la fotografía

Si la fotografía no ha sido tomada exactamente vertical, los objetos aparecen deformados por el desplazamiento debido a la inclinación de la fotografía. El área fotografiada en fotografía vertical es un cuadrado, en la fotografía inclinada es trapezoidal. La línea común a ambas fotografías se denomina *isolínea* pues en ella ambas fotografías tienen la misma escala.

El desplazamiento debido a la inclinación es radial a partir del isocentro.

Una fotografía rectificadora es aquella en la que se ha eliminado el desplazamiento por a la inclinación usando un instrumento llamado *rectificador*.

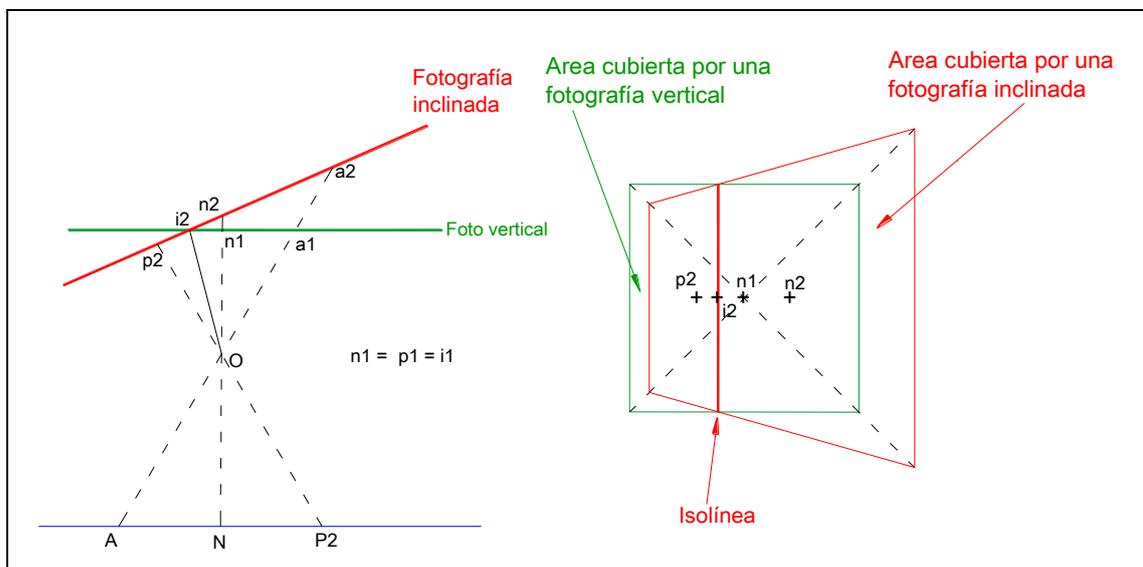


Figura 5.5. Desplazamiento debido a la inclinación de la fotografía.

## 5.1.6. Estereoscopía

### 5.1.6.1. Mecanismos de la visión

El ojo humano se asemeja a una cámara fotográfica, en él encontramos todos los elementos de una cámara fotográfica: el diafragma es el iris o pupila que se contrae y dilata; el objetivo es el cristalino, constituido por una sustancia gelatinosa que se deforma y da la distancia focal directamente por los músculos ciliares; la retina tiene un área llamada mácula lútea, que es donde se fija un determinado detalle. Si tapamos un ojo solamente por hábito percibimos las dimensiones, no vemos relieve.

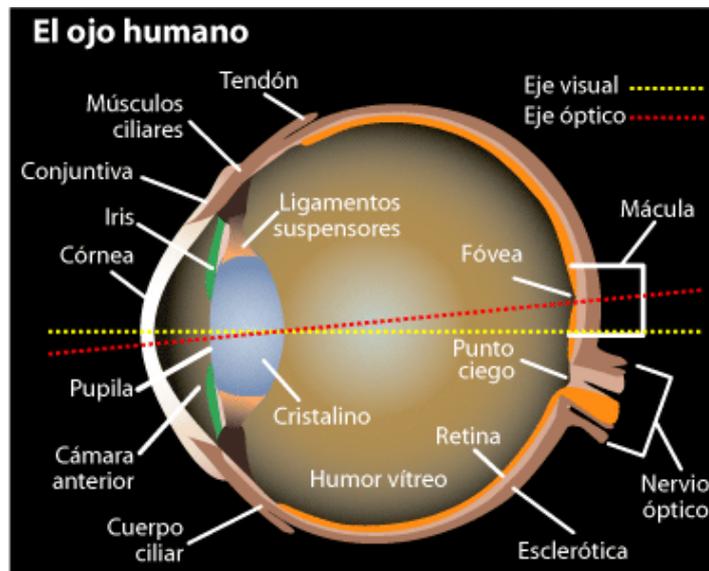


Figura 5.6. El ojo humano. Tomado de: Westland, 2001.

**Mácula:** ligera depresión en la retina; en su centro hay una minúscula región llamada **Fovea Centralis**, que contiene exclusivamente conos. La visión es mucho más aguda en la fovea que en las restantes porciones de la retina y los músculos que gobiernan el movimiento del ojo, hacen girar siempre el globo ocular hasta que la imagen del objeto que observamos cae directamente sobre la fovea. La porción exterior de la **retina** sirve para dar un cuadro general del campo visual.

Delante del **cristalino** se encuentra el **iris**, en cuyo centro hay una abertura llamada **pupila**, cuya función es regular la cantidad de luz que entra en el ojo, ya que se dilata automáticamente si el brillo del campo es pequeño y se contrae si aumenta.

### 5.1.6.2. Visión monocular y binocular. La visión estereoscópica artificial

Monocular es un solo ojo, por lo tanto no se observa la tercera dimensión. La visión estereoscópica (binocular) permite al hombre la observación tridimensional de los elementos que lo rodean. Cuando observamos un objeto, cada ojo recibe una imagen diferente del mismo, por ser proyecciones centrales desde dos puntos diferentes, ambas imágenes son fusionadas en el cerebro formando una imagen tridimensional del objeto.

En fotogrametría se sustituye el terreno u objeto por dos fotografías ligeramente diferentes por haber sido tomadas desde dos puntos distintos, de manera que las imágenes recibidas

por cada ojo no sean iguales y, al fusionarse en el cerebro, proporcionen una imagen tridimensional del terreno.

Los movimientos del ojo para la observación de un objeto son: acomodación y convergencia.

#### **5.1.6.2.1. Acomodación**

Para ver distintamente un objeto, ha de formarse su imagen nítida sobre la retina. Si todos los elementos del ojo tuvieran una porción rígida, habría sólo una distancia objeto para la cual se formará una imagen nítida sobre la retina, mientras que en la práctica el ojo normal enfoca con nitidez un objeto a cualquier distancia comprendida desde el infinito hasta unos 25 cm delante del ojo. Esto se hace posible por la acción del cristalino y del músculo ciliar, al cual está unido. Si el músculo no se halla contraído, el ojo está enfocado sobre objetos situados en el infinito, es decir, el foco imagen se encuentra sobre la retina. Cuando se quiere ver un objeto más cercano, el músculo ciliar se contrae y la forma del cristalino se aproxima más a la esférica.

#### **5.1.6.2.2. Convergencia**

Sucede cuando los ejes visuales concurren en un mismo punto de visión.

Ambas funciones (acomodación y convergencia) pueden ser realizadas en forma independiente, sin embargo estamos acostumbrados a realizar las dos funciones al mismo tiempo, para un mismo punto. Por este motivo, al observar en tres dimensiones fotografías aéreas con instrumentos fotogramétricos, tratamos que ambas funciones sean efectuadas en condiciones similares a las acostumbradas en nuestra vida diaria.

A fin de producir un modelo espacial, dos fotografías de un mismo objeto deben satisfacer las siguientes condiciones:

1.- Los ejes ópticos deben estar aproximadamente en un mismo plano.

2.- La relación B/Z debe ser entre los valores 0.02 y 2.

B: distancia entre las estaciones de exposición

Z: altura de vuelo.

Fuera de estos límites la visión estereoscópica es más difícil.

3.- La escala de las fotografías debe ser aproximadamente la misma. Se recomienda que la diferencia no sea mayor al 5%, aunque se puede observar hasta con un 15% de diferencia.

#### **5.1.6.3. Observación binocular de fotografías estereoscópicas**

Existen tres formas de hacerlo:

##### **5.1.6.3.1. Con ejes cruzados**

La imagen ubicada a la izquierda es observada por el ojo derecho y viceversa. Produce una extraordinaria fatiga por que la acomodación y la convergencia son realizadas independientemente.

##### **5.1.6.3.2. Con ejes convergentes**

Es el método normal y, por lo tanto, el más descansado. Como las dos fotos deben estar superpuestas, será necesario hacer la observación por medio de filtros, para que cada ojo reciba una imagen. Los sistemas más empleados son el Anaglifo, que emplea filtros de

colores complementarios - luz polarizada y luz intermitente que emplea obturadores giratorios que permiten la observación alternada de cada ojo.

### 5.1.6.3.3. Con ejes paralelos

Método de visión estereoscópica realizado contra natura que produce cansancio, ya que los ejes ópticos convergen en el infinito, mientras que la acomodación tiene lugar a una distancia finita. Para que acomodación y convergencia se realicen en el mismo punto se agregan lentes y se colocan las fotografías a una distancia igual a la distancia focal, así las funciones tienen lugar en el infinito.

### 5.1.6.3.4. Estereoscopios de Visión Directa

#### Estereoscopios de Bolsillo

Tienen en general lentes plano convexas cuya distancia focal es de 80 mm. La ampliación es:

$$\frac{250 \text{ mm (dist. normal lectura)}}{80 \text{ mm (distancia focal)}} = 3 \text{ X}$$

Son estereoscopios baratos, fáciles de transportar, pero tienen dos inconvenientes:

Su aumento es limitado,

La distancia entre puntos homólogos debe ser aproximadamente igual a la base ocular ( $\pm 65 \text{ mm}$ ), lo cual dificulta la observación de fotografías aéreas 23 x 23 cm.

Principio: se basa en la visión binocular con ejes paralelos.



Figura 5.7. Estereoscopios de bolsillo: a, Carl Zeiss Jena con base interpupilar fija; b, Wild TPS1 con espejos.

Se recomienda este tipo de aparatos para trabajos de campo; las marcas más comunes son: Casella, Tamaya, Topcon (todos con distancia interpupilar variable), Zeiss, Zeiss Jena (con distancia interpupilar o base fija).

#### Estereoscopios de espejos

Las dos desventajas anteriormente mencionadas condujeron a la construcción de estereoscopios de espejos, en que la distancia entre puntos homólogos es de aproximadamente 26 cm, permitiendo así la observación de fotografías aéreas sin necesidad de ser dobladas. Como la distancia de observación es de 30 cm, el aumento es de 0.8 X, pero en general se agregan binoculares que aumentan de 3 a 8 veces. Las marcas más comunes son: Wild, Zeiss, Topcon, Zeiss Jena, Canon, PZO.

Base estereoscópica: es la distancia entre los puntos homólogos y es variable según la marca y modelo de estereoscopios, entre 24 y 26 cm.

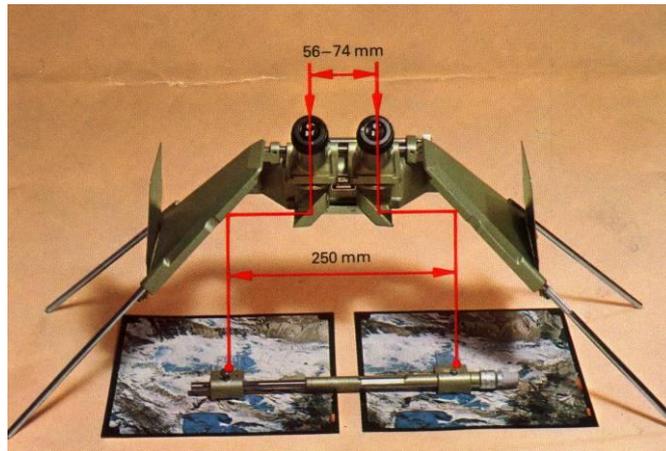


Figura 5.8. Estereoscopio de espejos Wild ST4 con barra de paralaje.

### Estereoscopios de visión simultánea

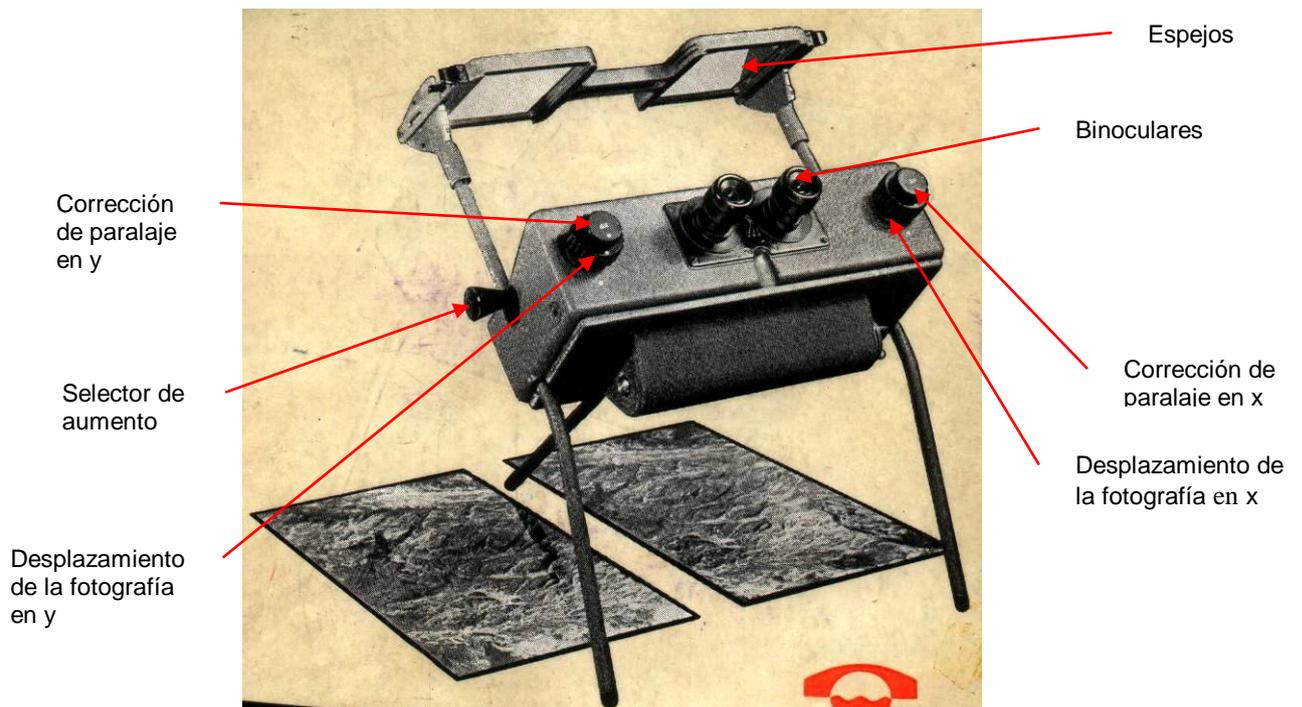


Figura 5.9. Estereoscopio Old Delft.

Son empleados con buen éxito en el entrenamiento de personal, posee elementos ópticos móviles para corrección de paralaje en X e Y, botones para el recorrido estereoscópico sin mover las fotografías y aumentos de 4X mediante las perillas de cambios. Las marcas conocidas son: Old Delft y el SF6-3b Galileo Santoni.

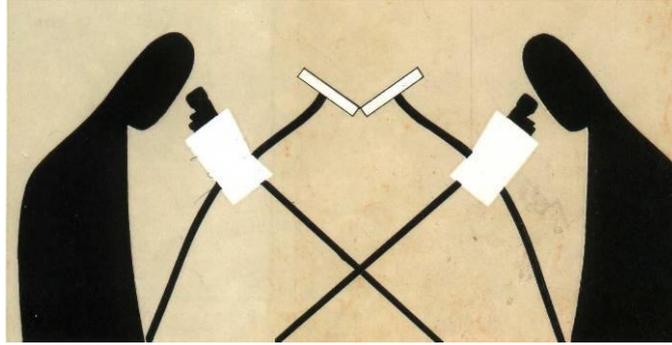


Figura 5.10. Esquema de la visión simultánea.

Estereoscopios de observación simultánea de dos fajas de fotografías

Son instrumentos diseñados para la observación estereoscópica continuada de una faja de fotografías. Con el ocular derecho se observan las fotografías pares colocadas sobre un plano horizontal y con el izquierdo las impares colocadas sobre un plano inclinado a 40°.

Sirve para proyectos de ingeniería, estudios geológicos, en proyectos de carreteras, ferrocarriles, etc.



Figura 5.11. Estereoscopio de visión simultánea de dos fajas de fotografías.

Estereoscopios para observación de fotos a distinta escala

Los espejos no son fijos, permitiendo un desplazamiento en el sentido X dentro de cierto rango. Esto hace posible que dos fotos de distinta escala puedan ser observadas estereoscópicamente desplazando cada uno de los espejos en distinta longitud y permitiendo que la imagen de cada fotografía se observe a igual escala.



Figura 5.12. Estereoscopio de observación de fotografías a distinta escala.

### Interpretoscopio

Básicamente está compuesto por una mesa luminosa, un estereoscopio y otros elementos complementarios como: a) Portacarretes, b) Sistema óptico (con estereoscopio) y c) Portafotos.

Es un aparato de interpretación de alto rendimiento, manejo sencillo y diseño conveniente.

El material a examinar puede estar formado por imágenes negativas o positivas sobre película en rollo, fotografías sueltas o placas de vidrio.

La mesa y el estereoscopio son finos, las imágenes pueden ser desplazadas en sentido X e Y conjuntamente en forma manual, como también relativamente por medio del giro óptico de las imágenes individuales. También, por medio de las marcas de medición en combinación con una regla graduada y un tornillo micrométrico, se puede leer el desplazamiento relativo de las imágenes en dirección X hasta con 0,02 mm de precisión, con el fin de determinar de manera aproximada diferencias de alturas entre objetos.

Aumenta la imagen de 2 a 15 veces, pudiéndose acondicionar para que dos personas puedan trabajar simultáneamente, uno a cada lado del instrumento.



Figura 5.13. Interpretoscopio Zeiss Jena.

### 5.1.6.3.5. Otros sistemas de observación

#### Anaglifo

Es un estereograma en el cual las dos fotos se proyectan o imprimen sobrepuestas en colores complementarios, usualmente rojo y verde, que vistos a través de lentes con filtros de los colores complementarios se observa una imagen estereoscópica.

#### Luz intermitente

Se basa en un instrumento que posee un binocular con celdillas en posiciones opuestas y giratorias de manera que permite la visión de un solo ojo; gira a gran velocidad, dando alternativamente la posibilidad de visión a cada ojo, permitiendo así la visión estereoscópica.

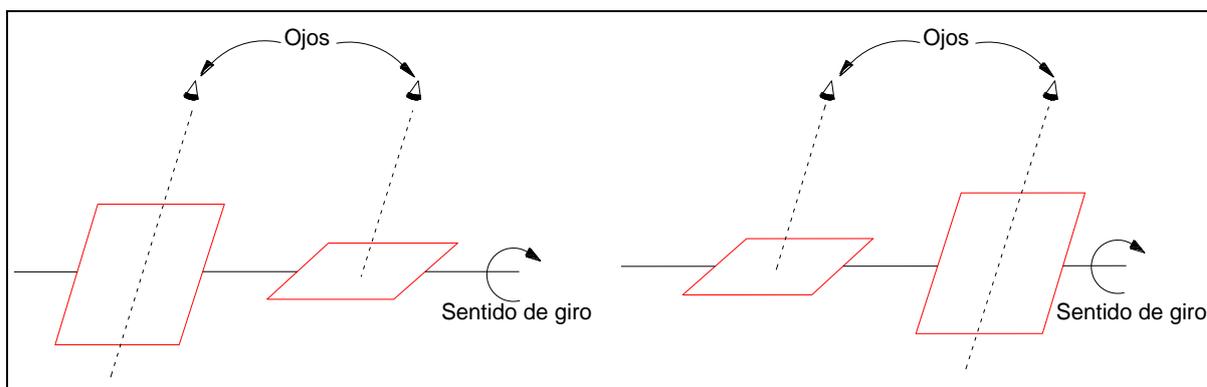


Figura 5.14. Luz intermitente

#### Observación estereoscópica sin instrumental

Se basa en la visión sin estereoscopio, colocando el estereograma a una distancia aproximada de 25 cm de los ojos, separados éstos con una cartulina o elemento similar a manera de evitar la convergencia de los ojos, permitiendo la visión tridimensional.



Figura 5.15. Observación estereoscópica sin instrumental

### 5.1.6.3.6. Exageración estereoscópica

Se produce debido a la diferencia entre la escala horizontal y la vertical de un modelo observado estereoscópicamente. Por ello las alturas y pendientes se insinúan más pronunciadas en el modelo estereoscópico que en la realidad.

Los factores que intervienen y sus relaciones son (Figura 5.16.):

1.- Durante la toma fotográfica: las relaciones geométricas entre la base aérea (B), la altura de vuelo (Z) y la distancia principal (c).

2.- Mientras se observa el modelo estereoscópico: las relaciones entre la distancia interpupilar (b), la separación entre fotografías (s) y la altura a la que se observan las fotografías (h).

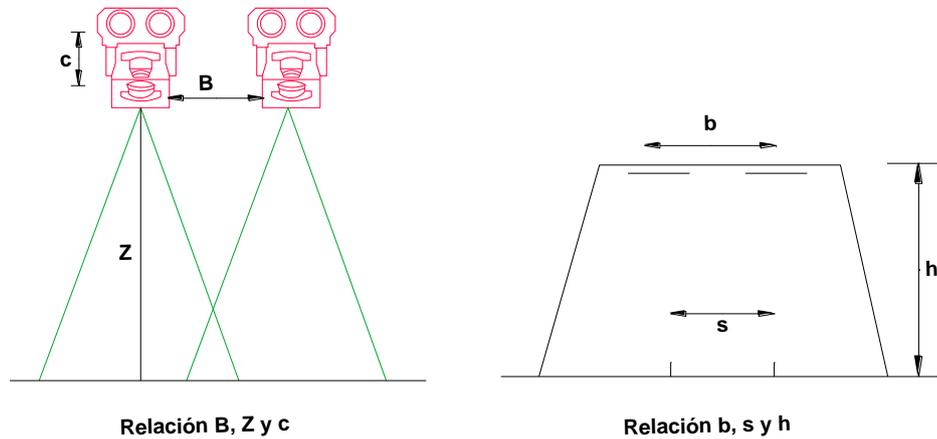


Figura 5.16. Factores que afectan la exageración estereoscópica.

La exageración estereoscópica depende del ángulo de intersección entre los rayos ópticos que forman la imagen de un punto en tercera dimensión, el cual a su vez depende de las relaciones de los elementos mencionados. Para que no exista exageración en las elevaciones del terreno, la relación entre la base aérea B y la altura de vuelo sobre el terreno Z debe ser igual a la relación entre la distancia interpupilar b y la altura de observación a la cual se forma el modelo estereoscópico m.

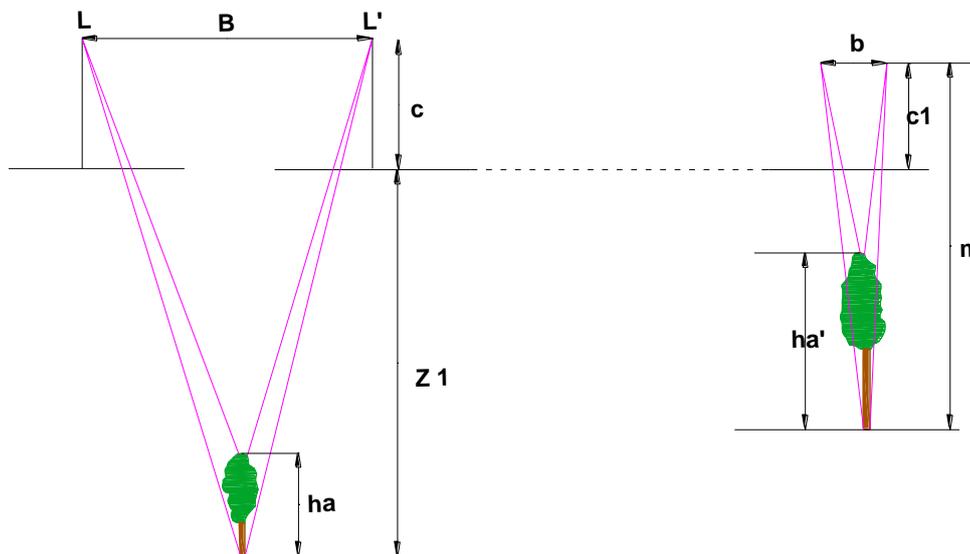


Figura 5.17. Relaciones entre bases y alturas.

Es decir si  $B/Z = b / m$ , no habrá exageración del relieve y el modelo óptico coincidirá en apariencia con el terreno fotografiado.

Sin embargo, y por lo general, B/Z suele ser mayor que b/m, provocando la exageración de la escala vertical del relieve en un modelo observado estereoscópicamente; a mayor relación de proporción, mayor será la exageración del modelo.

La relación B/Z es el principal factor de exageración del relieve, pero no el único, aún en el caso que B/Z sea igual a b/m, los otros factores, como la distancia principal c, pueden crear exageración aunque en un grado inferior. En cámaras granangulares la relación B/Z es de 0.6, mientras que en las supergranangulares de 1.

El conocimiento de la exageración estereoscópica es de gran importancia para la estimación de pendientes o buzamientos, ya que permite establecer la relación existente entre el valor de la pendiente observada en el modelo estereoscópico (p) y el valor real de la pendiente (q) en el terreno.

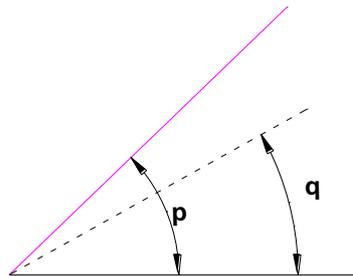


Figura 5.18. Pendiente real (q) y exagerada estereoscópicamente (p).

Una de las fórmulas que se utilizan para conocer la exageración es la de Jackson:

$$EV = \frac{B \times Q}{Z \times E}$$

B = base en el aire

Q = distancia de lectura y escritura normal: 25 cm

Z = altura de vuelo

E = base interpupilar

## 5.1.7. Paralaje

### 5.1.7.1. Principio de la marca flotante

Si al observar un par estereoscópico de fotografías se colocan marcas idénticas (o complementarias), sobre puntos homólogos de las fotografías, las dos marcas de medidas se verán como una sola marca flotante, aparentemente formando parte de la imagen y a la misma altura que la zona que la rodea.

Moviendo estas marcas artificiales, una respecto de la otra en dirección paralela a la línea de vuelo, para fotografías verticales de una misma faja, se verá la marca flotante subir o bajar con respecto al terreno.

A un desplazamiento  $x$  de una marca de medida respecto a la otra le corresponde una variación de altura  $h$ .

Los tipos de marcas más comunes son: círculos, puntos, cruces o en T. Las marcas pueden estar grabadas sobre material transparente para poder visualizar los detalles en las fotografías (Barra de Paralaje), o bien proyectadas ópticamente (estereoscopio Hilger & Watts con medición óptica de paralaje).

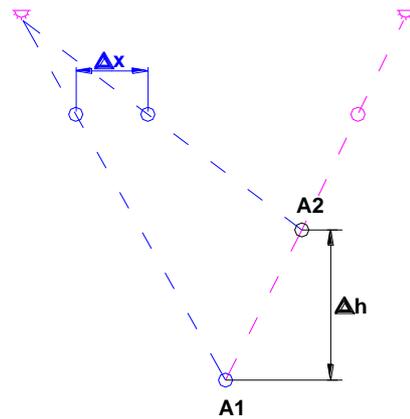


Figura 5.19. Principio de la marca flotante.

### 5.1.7.2. Paralaje absoluta o estereoscópica

Paralaje estereoscópica es el cambio en posición de la imagen de un punto en dos fotografías sucesivas, debido al cambio en posición de la cámara.

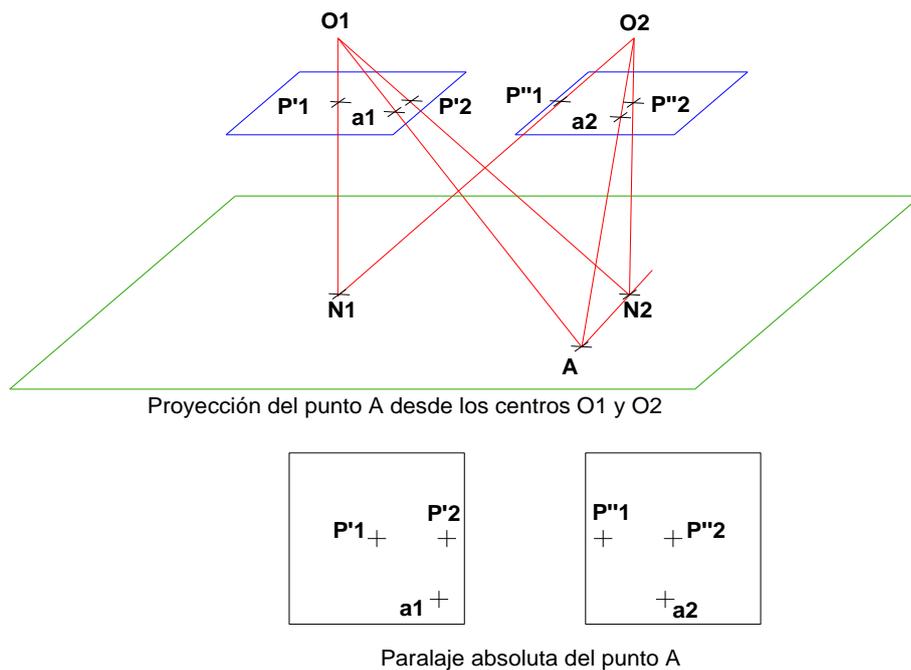


Figura 5.20. Paralaje absoluta o estereoscópica del punto a.

Un punto **A** fotografiado desde dos centros de perspectiva diferentes O<sub>1</sub> y O<sub>2</sub>. La Figura 5.20. muestra la paralaje estereoscópica de un punto desde una perspectiva oblicua y vista en planta.

Si se proyecta una pirámide de base cuadrada ABCD desde los puntos O<sub>1</sub> y O<sub>2</sub> se observará que el desplazamiento sufrido por el vértice **T** es diferente al desplazamiento de los cuatro puntos de la base.

Vale decir que sus paralajes estereoscópicas son iguales por pertenecer a un mismo plano horizontal. La paralaje del vértice PT es diferente pues está por encima del citado plano horizontal.

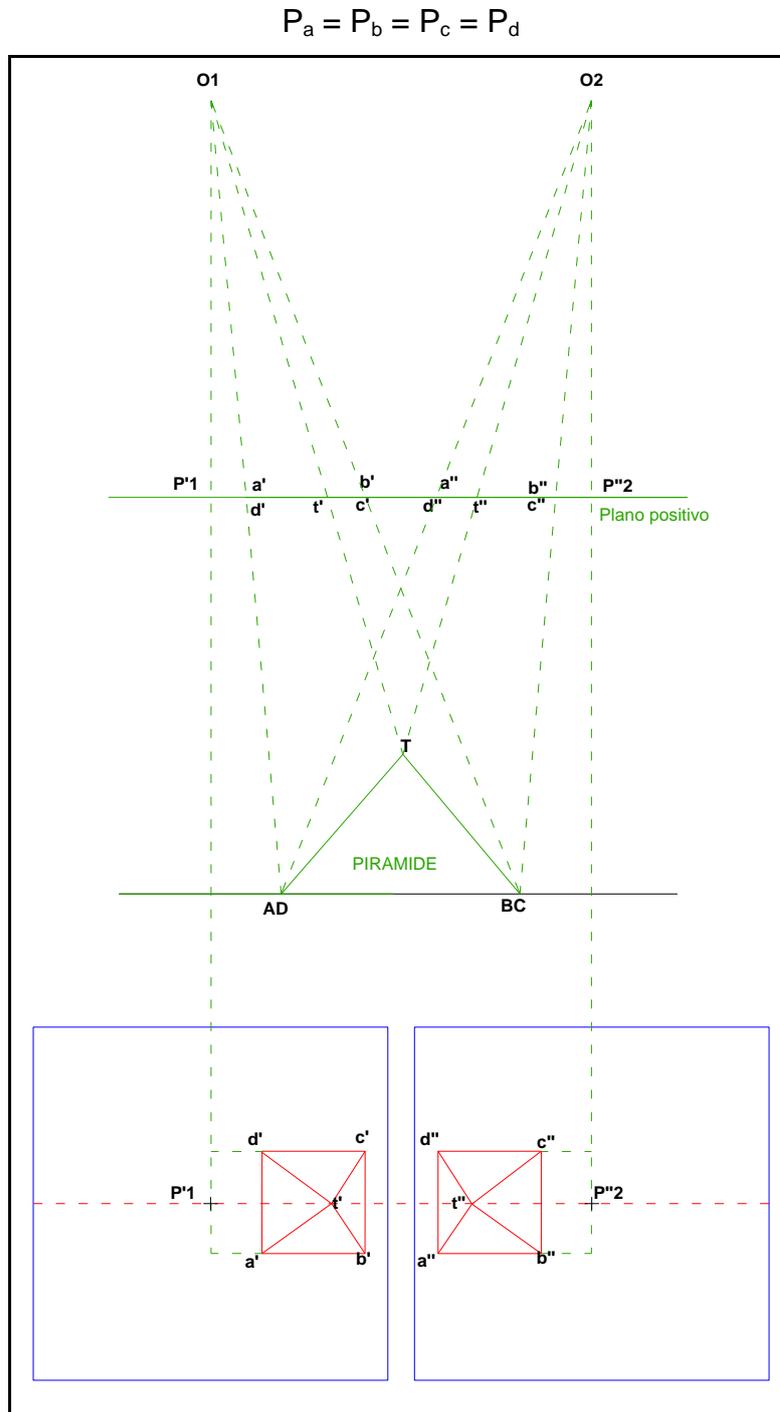


Figura 5.21. Diferencia de paralajes por diferencias de alturas.

Los puntos imágenes o puntos homólogos  $t'$  y  $t''$  son excéntricos, es decir que están desplazados con respecto a su verdadera posición debido al desplazamiento por relieve originado por la diferencia  $h$  (altura de la pirámide). Se comprueba entonces que la paralaje estereoscópica varía con la altura del punto considerado.

Los puntos homólogos son aquellos que representan el mismo detalle en el terreno.

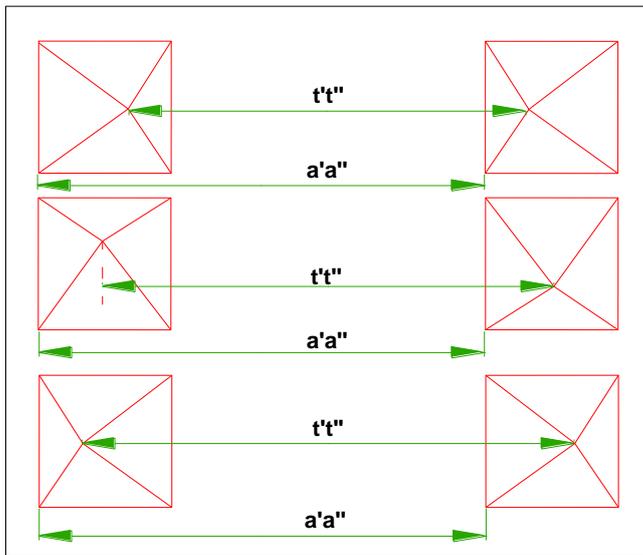
La diferencia entre las distancias existentes entre dos pares de puntos imágenes correspondientes, es igual a la diferencia de paralaje.

$$P_{AT} = PA - PT = (P_1' P_2'' - a'a'') - (P_1' P_2'' - t't'') = a'a'' - t't''$$

Las distancias  $a'a''$  y  $t't''$  pueden ser medidas con una regla corriente pero, para mayor precisión, se emplea una barra de paralaje o estereomicrometro.

La mayoría de las barras de paralaje emplean una escala invertida, o sea que, a mayor distancia  $a'a''$  corresponde una lectura menor. La razón de esta inversión es que al emplear la fórmula de paralaje, esta sea válida en valor y también en signo.

Al observar las imágenes de la pirámide se obtendrá una imagen estereoscópica, pero si se giran ambas imágenes 90° en un mismo sentido, la imagen se verá "plana", y al girarla 180° se verá la imagen pseudoscópica (relieve invertido).



$t't''$  es menor que  $a'a''$   
 IMAGEN ESTEREOSCÓPICA

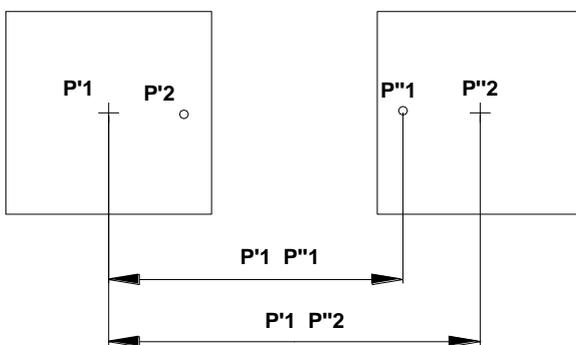
$t't''$  es igual que  $a'a''$   
 IMAGEN PLANA

$t't''$  es mayor que  $a'a''$   
 IMAGEN PSEUDOSCÓPICA

De acuerdo a la definición, la paralaje absoluta (o paralaje estereoscópica) del punto  $a$  es:

$$P_a = \overline{P_1' P_2''} - \overline{a_1 a_2}$$

**5.1.7.2.1. Paralaje estereoscópica para un punto principal**



Siendo  $P''_1$  y  $P''_2$  los homólogos de las imágenes  $P'_1$  y  $P'_2$ , la paralaje de un punto principal será:

$$Pp_1 = P_1' P_2'' - P_1' P_1'' = P_1'' P_2'' = b$$

$b$ : Distancia entre el punto principal de una fotografía y el principal de la otra transferida a aquélla. No es más que la *base en el aire* medida en la fotografía.

Figura 5.22. Paralaje de un punto principal.

**5.1.7.2.2. Base en el aire**

Es la distancia entre dos centros de proyección  $O_1$  y  $O_2$ , o sea entre dos exposiciones consecutivas.

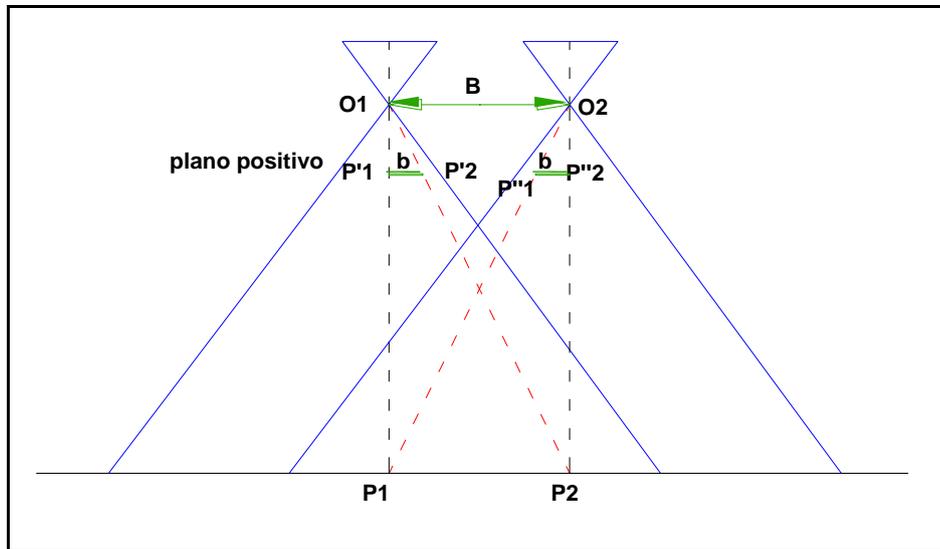


Figura 5.23. Base en el aire.

B: Base en el aire;

b: Base en la fotografía o base estereoscópica; esta no debe confundirse con la base del estereoscopio.

**5.1.7.2.3. Fórmula de paralaje**

Es la función matemática que relaciona diferencias de paralaje con diferencias de altura.

$c$  = Distancia principal

$B_i$  = Base en el aire

$Z$  = Altura de vuelo

$P_a$  = Paralaje estereoscópica del punto A

$Z_a$  = altura de vuelo sobre el punto A

Relacionando los dos triángulos semejantes y para un punto genérico A, se tiene:

$$\frac{Z_a}{c} = \frac{B}{P_a} \qquad Z_a = \frac{B \cdot c}{P_a}$$

Escribiendo la fórmula para un punto de referencia R será:

$$Z_r = \frac{B \cdot c}{P_r}$$

Definimos  $\Delta Z$  y sustituimos  $Z_a$  y  $Z_r$  por su valor:

$$\Delta Z = Z_a - Z_r = \frac{B \cdot c}{P_a} - \frac{B \cdot c}{P_r} = B \cdot c \left( \frac{1}{P_a} - \frac{1}{P_r} \right) = B \cdot c \frac{P_r - P_a}{P_a \cdot P_r}$$

Si definimos  $P_a - P_r = \Delta P$  y se sustituye en la expresión anterior:

$$\Delta Z = \frac{B \cdot c}{P_r} \cdot \frac{-\Delta P}{P_r + \Delta P} \qquad \Delta Z = \frac{Z_r}{P_r + \Delta P} \cdot (-\Delta P)$$

Para eliminar el signo negativo se sustituye  $\Delta Z = - \Delta h$  ya que:

$$\Delta Z = Z_a - Z_r = - (h_a - h_r) = -\Delta h$$

Esto sale debido a que se ha partido de que  $h = h_a - h_r$ , lo cual significa que si la altura de vuelo sobre el punto A es mayor que sobre el punto de referencia, el h será positivo, así, puntos con una mayor elevación que R tienen un h negativo.

Finalmente se obtiene la fórmula del paralaje:

$$\Delta h = \frac{Z_r}{P_r + \Delta P} \Delta P$$

La diferencia de paralaje  $\Delta P$  también puede expresarse en función de la diferencia de altura h:

$$\Delta P = \frac{P_r}{Z_r - \Delta h} \Delta h$$

Las fórmulas aproximadas se obtienen eliminando  $\Delta P$  y  $\Delta h$  que figuran como sumandos en el divisor en las respectivas ecuaciones, así:

$$\Delta h = \frac{Z_r}{P_r} \Delta P \qquad \Delta P = \frac{P_r}{Z_r} \Delta h$$

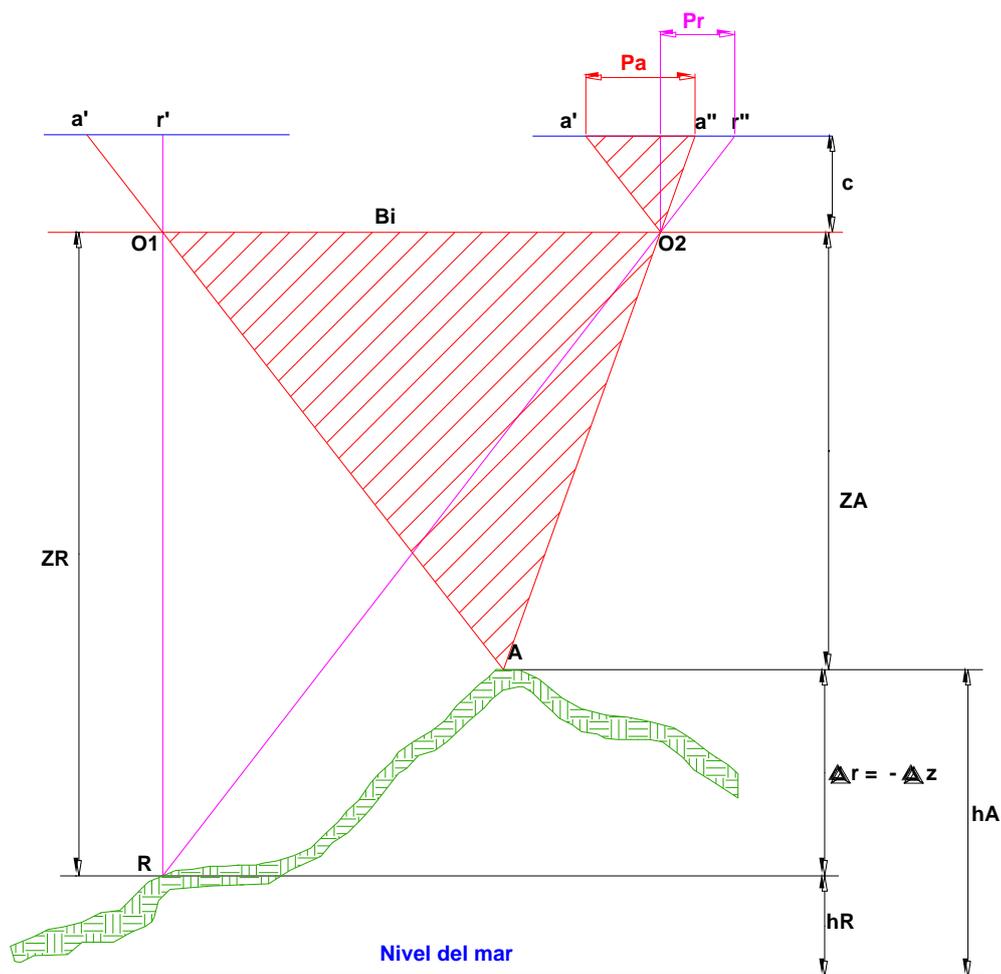


Figura 5.24. Esquema de la fórmula de paralaje.

## 6. INTERPRETACIÓN VISUAL DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS

### 6.1. Principios y técnicas de la fotointerpretación

#### 6.1.1. Definición

La fotointerpretación es el arte o ciencia de examinar las imágenes de los objetos fotografiados con el propósito de identificarlos, deducir su significado y valorarlos según el fin que se persigue.

La fotointerpretación puede definirse también como el proceso de razonamiento correlativo por el cual se obtiene la clasificación de los objetos visibles en fotografías por medio del conocimiento local o específico, con o sin el uso de claves de identificación u otros medios de información.

Las definiciones presentadas muestran la relevancia que tiene la fotointerpretación en la evaluación y valoración de los recursos naturales, a través de su representación en las fotografías aéreas.

#### 6.1.2. Características

La fotointerpretación puede ser:

Directa: cuando concierne a los objetos visibles e identificables sobre las imágenes fotográficas.

Correlativa: cuando las entidades en estudio no son visibles directamente y su interpretación se realiza a través de rasgos que dan indicios de su existencia. Un caso típico de interpretación correlativa corresponde al estudio de las unidades de suelos.

A pesar de la visibilidad o no de los objetos en estudio, en una primera instancia la fotointerpretación se considera provisional, requiriéndose el trabajo de campo como medio de comprobación para establecerla como concluyente. En este sentido, la fotointerpretación es de suma utilidad al momento de planear las visitas o los muestreos a campo para recabar datos e información.

La visibilidad de cualquier objeto en la foto-imagen no siempre es total y además su aspecto exterior no suele revelar completamente sus características; es por ello que, la fotointerpretación es solo una de las etapas de los proyectos de investigación básica o aplicada.

#### 6.1.3. Fases de la fotointerpretación

- Detección
- Reconocimiento e Identificación
- Análisis
- Deducción
- Clasificación
- Idealización

Las cuatro primeras fases de la fotointerpretación no son etapas independientes sino que corresponden a instancias de un mismo proceso, desarrolladas simultáneamente.

#### **6.1.3.1. Detección**

Consiste en analizar visualmente y extraer en forma selectiva los objetos o elementos de importancia en función de criterios fijados por los objetivos definidos por el proyecto que se lleva adelante.

#### **6.1.3.2. Reconocimiento e Identificación**

En esta etapa, los objetos detectados son identificados y se reconoce su naturaleza. Ambos procesos (reconocimiento e Identificación) conforman la "foto-lectura" y constituyen la fase de reconocimiento directo.

El reconocimiento e identificación están tan relacionados que se considera una sola fase y, junto con la detección, ocurren en forma instantánea.

#### **6.1.3.3. Análisis**

Se denomina así al proceso de agrupar y delinear conjuntos de objetos o elementos que comparten una serie de características que los hace diferentes del resto; dicha individualización es fuertemente influenciada por la escala del levantamiento fotográfico.

Las clases delineadas y sus límites pueden ser catalogados como confiables, moderadamente confiables o tentativos.

#### **6.1.3.4. Deducción**

Esta fase está basada en evidencias convergentes, aportadas por el conocimiento específico que tiene el intérprete sobre los objetos representados en los fotogramas.

Hay deducciones inmediatas, que son las hechas por expertos que conocen y están bien relacionados con un cierto conocimiento local y temático específico.

#### **6.1.3.5. Clasificación**

Una vez completadas las fases anteriores, la clasificación es la instancia en la cual se procede a la descripción individual de los grupos de objetos delineados durante el análisis y su arreglo en un sistema adecuado y ordenado de codificación que constituirá la leyenda de la futura cartografía.

#### **6.1.3.6. Idealización**

Es la materialización de la fotointerpretación en una hoja cartográfica. Es el proceso de dibujar las entidades interpretadas – idealización cartográfica – utilizando simbología estandarizada para su representación.

#### **6.1.3.7. Niveles de Referencia**

Corresponde al nivel de conocimientos que ostenta el intérprete y que le sirve como referencia al momento de realizar la interpretación correlativa de los objetos representados en las fotografías.

##### **6.1.3.7.1. Nivel de Referencia General**

Se refiere al nivel de conocimientos generales; es decir respecto a todas las disciplinas en general: matemáticas, física, química, geografía, ecología, biología, etc..

**6.1.3.7.2. Nivel de Referencia Específico**

Referido al nivel de conocimientos respecto a un disciplina en particular: edafología, ingeniería civil, manejo forestal, procesos geomorfológicos, etc.; vale decir que, este nivel se relaciona con el conocimiento especializado que posee el fotointérprete sobre las entidades, los procesos o fenómenos en análisis.

**6.1.3.7.3. Nivel de Referencia Local**

Se considera en este ítem al conocimiento que posee la persona respecto a las características de la zona en estudio.

**6.2. Factores que determinan el reconocimiento de un objeto**

Los factores que determinan el reconocimiento de un objeto constituyen los mecanismos y las facultades que permiten al foto-intérprete reconocer, agrupar, clasificar y describir a los objetos visibles en la imagen fotográfica y los ocultos representados por rasgos característicos.

Tabla 6.1. Factores que determinan el reconocimiento de un objeto.

Grupo	Descripción	Factor
I	De los objetos en sí mismos	Densidad o grado
		Forma o tamaño
		Regularidad e irregularidad
		Sitio o posición geográfica y asociación
		Patrón
II	De su representación en un par estereoscópico	Distinción (contraste)
		Sombras
		Color y tono (absoluto y relativo)
		Textura
III	De la calidad de las fotografías	Cámara (objetivos, filtros, sistema de suspensión)
		Materiales fotográficos
		Condiciones de toma y procesamiento fotográfico
		Movimiento del avión o de los objetos fotografiados
IV	De la capacidad del intérprete	Aptitud psicológica: imaginación, paciencia y metodología
		Aptitud individual: fisiología de los ojos, acomodación, convergencia, defectos de la visión
		Nivel de referencia de los objetos en estudio
		Entrenamiento en fotointerpretación

**6.2.1. De los objetos en sí mismos**

**6.2.1.1. Densidad o grado**

Representa la frecuencia con que se presentan los objetos en un arreglo espacial y la inclinación del relieve. Como ejemplos se pueden mencionar a: gradiente de la pendiente, ángulo de buzamiento, densidad de árboles, densidad de drenajes, densidad de habitaciones, etc.

### **6.2.1.2. Forma y tamaño**

Es un factor muy importante para el reconocimiento de los objetos y es afectado por la escala del fotograma y poder de resolución de la película. Este factor permite distinguir: valles en U de valles en V, claros naturales de los artificiales, ríos navegables de los no navegables, tamaños (dominancia) y formas de copas, entre otros.

### **6.2.1.3. Patrón**

Corresponde a los arreglos espaciales que conforman los objetos en su distribución natural o artificial. El tipo de arreglo espacial es característico de algunas comunidades vegetales, de micro relieves en algunas geoformas, del escurrimiento superficial, formas y magnitudes erosivas, formas de ordenar las habitaciones por parte de comunidades humanas, entre tantos otros.

### **6.2.1.4. Regularidad e irregularidad**

La existencia o no de ritmos en los arreglos espaciales permiten la identificación directa o correlativa de los objetos.

### **6.2.1.5. Sitio o posición geográfica y asociación**

Las características geográficas generales y las condiciones específicas del sitio fotografiado determinarán la probable aparición de determinados objetos; por ejemplo: especies o tipos de vegetación, clases de suelos, patrones de drenaje asociados al tipo de estructuras geológicas, rasgos geomorfológicos, etc.

## **6.2.2. De su representación en un par estereoscópico**

### **6.2.2.1. Distinción (contraste)**

El contraste corresponde al cambio de tonalidades presentes en una imagen fotográfica que permite la distinción entre objetos en función de sus características y de la diferencial iluminación que reciban. El contraste puede definirse también como la relación entre las intensidades luminosas reflejadas, transmitidas o absorbidas por parte de los objetos o porciones de ellos.

Las características reflectivas y emisivas de los objetos influyen en su representación en la imagen fotográfica y, por consiguiente, en la discriminación de los mismos.

### **6.2.2.2. Sombras**

Es el efecto producido por la falta de iluminación debido a la posición de la fuente lumínica (sol) y la altura de los objetos. El relieve es el principal factor que provoca sombras y tiene dos efectos contrapuestos: por un lado, facilita la interpretación ya que permite conocer la forma y tamaño de los objetos, pero, por el contrario, en los sectores afectados por las sombras no es posible visualizar con claridad los objetos que allí se encuentran.

Este último caso corresponde por ejemplo a los cañadones profundos o laderas con pendientes pronunciadas que presentan un lado iluminado y otro sombreado que oculta los objetos. Como ventaja puede señalarse que la sombra permite la estimación de la altura de los objetos, conociendo la elevación del sol en el momento de la toma fotográfica.

### **6.2.2.3. Tono y color**

Color: Percepción sensorial de la retina del ojo humano a la luz reflejada por los objetos en el rango visible del espectro electromagnético.

Tono: matices o gama de una escala de color monocromática; por ejemplo, niveles de gris que existen entre el color blanco y negro puros.

La fotografía color permite una mayor discriminación de los objetos debido a que presenta tonalidades en cada uno de los componentes azul, verde y rojo (o del sistema que se trate). Por el contrario, la fotografía pancromática blanco y negro está limitada a una gama de grises.

El tono es afectado por: las características reflectivas del objeto, la posición y topografía, la sensibilidad de la película, las condiciones de la atmósfera (Ej. bruma) en el momento de la toma fotográfica, la altura de vuelo, condiciones de humedad del suelo, estado sanitario y edad de la vegetación, entre otros factores.

### **6.2.2.4. Textura**

Es la frecuencia de cambio y disposición de los tonos dentro de la imagen fotográfica. Normalmente se clasifica en cuatro clases: Suave (superficie de aguas), Fina (campo desnudo o con pastizal), Media (renovales en bosque) y Gruesa (bosque adulto).

## **6.2.3. De la calidad de las fotografías**

### **6.2.3.1. Cámara (objetivos, filtros, sistema de suspensión)**

Las características de los componentes de la cámara fotográfica, al igual que el sistema de suspensión y el equipo auxiliar tienen una fuerte influencia en la calidad de la fotografía aérea. Estos aspectos ya fueron tratados en el capítulo 4.1. Obtención de Fotografías Aéreas.

### **6.2.3.2. Materiales fotográficos**

El tipo de material fotográfico determinará no solo la calidad de la imagen sino también la capacidad para registrar diferentes aspectos de interés; además de la delimitación de los objetos, tanto sus características como su condición, por ejemplo el uso de película infrarroja para el estudio del estado sanitario de la vegetación. Los materiales fotográficos fueron tratados en 4.1.8.3. La formación de la imagen con cámaras analógicas.

### **6.2.3.3. Condiciones de toma y procesamiento fotográfico**

Estas cuestiones ya fueron abordadas en el tema 4.1.6. Evaluación del vuelo fotográfico.

### **6.2.3.4. Movimiento del avión o de los objetos fotografiados**

Los aspectos vinculados a los movimientos del avión ya tratados en temas anteriores (4.1.6. Evaluación del vuelo fotográfico) tienen una importancia supina tanto en la calidad de la imagen resultante como en la aplicación métrica de la misma.

## **6.2.4. De la capacidad del intérprete**

### **6.2.4.1. Aptitud psicológica: imaginación, paciencia y metodología**

La interpretación de fotografías requiere no solo capacidad deductiva sino también un estado de concentración relajada, que permita al intérprete integrar lo que ve con lo que conoce del mundo real, siguiendo un esquema organizado.

### **6.2.4.2. Aptitud individual: fisiología de los ojos, defectos de la visión**

Este aspecto está directamente relacionado con las características físicas del intérprete, principalmente con la capacidad visual de sus ojos.

### **6.2.4.3. Nivel de referencia de los objetos en estudio**

La influencia de los conocimientos generales y particulares del especialista en el resultado final de la interpretación ya fueron tratados en el tema 6.1.3.7. Niveles de Referencia.

### **6.2.4.4. Entrenamiento en fotointerpretación**

Como en todas las disciplinas, el entrenamiento provee mayores capacidades para la ejecución de las tareas y resultados más adecuados. El entrenamiento de personal suele ser uno de los ítem de mayores costos en un proyecto.

## **6.3. Proceso de la fotointerpretación**

Está basado en una serie de estímulos (tono, textura, sombras, forma, tamaño, etc.) y la respuesta del cerebro a ello.

Existen normas comunes y generales que llevadas a cabo de una manera ordenada, facilitan la interpretación. Dichas normas son:

- a) La interpretación debe ser realizada de una manera metódica.
- b) En cada parte debe empezarse por estudiar las características generales y seguir luego con las específicas (de lo general a lo particular).
- c) Deben identificarse primero los objetos conocidos para, mediante ellos, llegar a la interpretación de los desconocidos.
- d) La interpretación debe hacerse teniendo en cuenta las características de las fotografías que se disponen.

## **6.4. Aplicaciones de la fotointerpretación**

La fotointerpretación y la fotogrametría tienen aplicaciones en diferentes disciplinas científicas y técnicas que requieren del auxilio de una herramienta que permita evaluar y cartografiar el objeto en estudio.

Las ciencias vinculadas con los recursos naturales, su aprovechamiento y manejo, son las que tradicionalmente utilizaron a las imágenes de sensores remotos como fuente de datos e información para los estudios disciplinarios. En general, todas las ramas de la geografía encontraron en la fotografía aérea un apoyo para el estudio más detallado de los paisajes terrestres y de las actividades que en ellos desarrollan las comunidades humanas.

Entre las disciplinas más tradicionales se pueden mencionar a la Geología, Geomorfología, Edafología, Arqueología, Demografía y Geografía Económica. Dentro de la rama de las ingenierías se destacan la Civil, Vial, Agronómica, Forestal y en Medio Ambiente. En este contexto no se puede omitir a la Arquitectura que, aunque con mucha menor asiduidad, también utiliza la herramienta fotográfica no solo para el registro de monumentos y obras de arte edilicias, sino también para la planificación urbana y el urbanismo. La Agrimensura es también otra disciplina que requiere de un fuerte auxilio de una herramienta que permite visualizar al territorio desde otra perspectiva.

De las disciplinas interesadas en el manejo del medioambiente natural para su explotación racional o preservación, cobran relevancia las temáticas de vida silvestre, cuencas, recursos vegetales nativos y la Ecología en general.

La actividad técnico científica que más uso hace de la fotografía aérea es sin dudas la Cartografía en todas sus facetas y aplicaciones. En este sentido se debe prestar atención a la gran aplicación de las imágenes de sensores remotos en las aplicaciones vinculadas a la propiedad de la tierra (catastro urbano y rural) y a los límites administrativos. Sin dudas que la Geodesia y Geofísica son también usuarios de tan mentada herramienta tecnológica, la fotografía aérea y satelital.

Las aplicaciones militares son también muy importantes; tanto es así que, el desarrollo de la técnicas vinculadas a los levantamientos aerofotográficos recibieron un fuerte impulso durante los conflictos bélicos como herramienta cartográfica, de espionaje y planificación estratégica.

Dentro de las aplicaciones especiales de fotointerpretación, tanto para medicina como para estudios microbiológicos y de microestructuras, se pueden mencionar a: Fotomicrografía, Electromicroscopía, Radiografía de rayos Gamma y X.

## **6.5. Interpretación de áreas boscosas en zonas templadas**

Antes de programar y realizar un levantamiento aéreo fotográfico, el profesional encargado deberá analizar minuciosamente los objetivos del proyecto y las características del área objetivo ya que de ellos dependerá la elección de la escala del levantamiento y de la combinación de filtros y película a utilizar.

Acto seguido, el intérprete deberá familiarizarse con las condiciones locales del bosque y las técnicas forestales a aplicar para encontrar requerimientos específicos y obtener información de base pertinente. Las etapas de fotointerpretación que se presentan a continuación son válidas para los bosques europeos, norteamericanos (Canadá y EEUU), nuestros bosques andino patagónicos y los bosques implantados.

El programa de acción se compone de seis etapas.

- Reconocimiento general;
- Fotoanálisis;
- Compilación del mapa preliminar;
- Chequeo a campo;
- Reinterpretación y construcción del mapa final; y,
- Elaboración del informe final.

### **6.5.1. Reconocimiento general**

Incluye una revisión de la literatura existente de la temática y de la zona a investigar, el conjunto de mapas disponibles para el área y la historia de las actividades de manejo en el pasado. Se debe recolectar información de la geografía, clima, geología, estado del suelo, sistemas de drenajes, composición florística, clases de sitio, tipo de manejo, accesos, infraestructura y mano de obra disponible. Una revisión de fotografías aéreas o de imágenes satelitales revelará localización de los estratos importantes y las posibilidades de acceso. Sobre un mapa provisorio o imagen mapa deben indicarse los sectores más relevantes a ser visitados durante el viaje de reconocimiento, al igual que límites, caminos existentes, cursos de agua y obstáculos o barreras como pantanos, barrancas, etc.

Durante el reconocimiento de campo el fotointérprete, equipado con las fotografías, el mapa y estereoscopio de bolsillo, aprende a relacionar lo que ve en los estereopares y la realidad en el terreno. También es necesario conocer la fecha (antigüedad) de las fotografías, y la tipificación de los árboles (propiedades cuali y cuantitativas) que componen los rodales.

El levantamiento de campo deberá planearse en función de la diversidad específica y de edad de los rodales forestales, aplicando el tipo de muestreo estadístico que se ajuste más a las características de la vegetación y a la accesibilidad de la zona. Normalmente, para los estudios de vegetación se utilizan técnicas mixtas de muestreo estratificado o por conglomerados y de otro tipo como al azar. Debe tenerse presente también que las fotografías son una herramienta que permite reducir fuertemente los muestreos a campo ya que se dispone de un modelo de la realidad a una escala de representación.

Durante la visita de campo, el profesional deberá realizar anotaciones de las características generales de la vegetación - diversidad y distribución de los estratos forestales - y de los aspectos necesarios para la confección de patrones y claves de interpretación, muy útiles en la etapa posterior de fotoanálisis. La vista de reconocimiento deberá ser muy eficiente para reducir el tiempo de permanencia en el campo, ya que los costos de campaña inciden fuertemente en el presupuesto total del proyecto.

### **6.5.2. Fotoanálisis y mapa preliminar**

En estudios de detalle, la unidad de interpretación más pequeña en la fotografía no debe ser menor a 5 mm de diámetro o 3 mm de ancho de faja. Para estudios de reconocimiento los rangos son mayores dadas las escalas más pequeñas. Áreas que son pequeñas o angostas deben ser incluidas en el tipo adyacente de aspecto más similar.

La composición específica, la altura y densidad de copas son, en ese orden, los criterios más importantes para decidir si una unidad debería ser combinada o separada de los tipos circundantes.

Al comienzo de la interpretación se trazan los límites del proyecto en las fotografías; a continuación se delinearán los rasgos de la infraestructura básica (caminos, vías férreas, caseríos, etc.), drenajes principales y límites de cuencas. Utilizando claves de fotointerpretación y documentos y mapas de referencia, el fotointérprete extraerá de las fotografías la información deseada referida a la identificación de clases forestales, especies maderables, tamaño y forma de las copas y altura de los árboles.

La interpretación es luego transferida a un mapa base, una carta imagen o un fotomosaico controlado, utilizando diferentes métodos para corregir las deformaciones propias de la fotografía aérea, cumpliendo con los estándares de precisión establecidos para el tipo de mapa y escala de representación final.

### **6.5.3. Chequeo a campo**

Una nueva visita al campo es necesaria para controlar y corroborar la interpretación previamente realizada; por otra parte también es usado para recabar nueva información para la realización del informe final.

La intensidad del control varía, por supuesto, en función de la diversidad del ecosistema y de la exactitud interpretativa fijada para el mapa final. El chequeo suele realizarse sobre puntos de prueba, localizados con algún criterio, sobre el mapa preliminar, transferidos a la fotografía y localizados en el campo. Los datos registrados en los puntos de comprobación son luego contrastados con los datos asignados a la unidad interpretada previamente.

Durante el chequeo de campo también se recaban datos e información respecto a la edad de las masas forestales, calidad de sitio, tipo de manejo forestal aplicado, etc.

### **6.5.4. Mapa final e informe**

Evaluada la interpretación preliminar en base al chequeo de campo, se procede al ajuste de las delineaciones y a la confección de la cartografía y leyenda finales. Es conveniente que las unidades delineadas consideren además de las clases de bosques, los tipos de relieve y de suelos presentes, con el objeto de ofrecer información más completa e integrada que permita definir las pautas de manejo y explotación. En este sentido, no puede obviarse la información referida a: composición de especies, volumen maderable, edad del rodal, clases de sitio, pendientes, densidad de caminos, entre otros.

En el informe final se consignan los objetivos del estudio y se describen los siguientes aspectos: las fases seguidas para la ejecución del proyecto, los materiales utilizados (fotografías aéreas, mapas temáticos, informes técnicos, descripciones, guías y de reconocimiento, etc.), parámetros del vuelo fotográfico, los criterios seguidos en la fotointerpretación, las tareas realizadas durante los viajes de campo, el proceso cartográfico, el procesamiento y evaluación de datos. Finalmente se presentan los resultados, acompañados por conclusiones y recomendaciones concordantes con los objetivos del estudio.

## **6.6. Interpretación de áreas boscosas en zonas tropicales**

De la metodología vista para los bosques templados es también muy útil para la interpretación en zonas tropicales. Sin embargo, los bosques tropicales naturales difieren considerablemente de los de regiones templadas. Las áreas boscosas suelen ser de mayores dimensiones y poseen una gran diversidad de tipos de vegetación natural, debidas principalmente a las condiciones climáticas imperantes en las zonas tropicales. El clima en las zonas tropicales se caracteriza por las altas precipitaciones y temperaturas que determinan una mayor capacidad del ambiente para la alteración físico química de la roca madre o el sustrato, una mayor aceleración pedogenética y el consecuente desarrollo de la fauna y la flora.

La influencia humana está caracterizada por: infraestructura vial, áreas urbanizadas, rublos y parajes, desmontes para la habilitación de tierras con destino a la agricultura, ganadería intensiva o extensiva y la explotación forestal. La ocurrencia de incendios, tanto espontáneos como inducidos suele ser poco frecuente en estas zonas debido a la humedad imperante a lo largo del año.

Generalmente, los estudios son emprendidos para localizar bosques comerciales. El mayor número de especies valiosas se encuentran, normalmente, en los bosques pluviales, los

bosques siempre verdes y los bosques monzónicos de hojas caedizas. La fotointerpretación aplicada a estas tres formaciones forestales no difiere sustancialmente.

Las fotografías aéreas no suelen ser actualizadas, pero esto no resulta un problema si el lugar no sufre grandes modificaciones en el tiempo por parte del hombre. Por otra parte, la configuración de los tipos forestales no suele cambiar salvo la ocurrencia de desastres naturales o inducidos por el hombre, pero de gran magnitud y extensión.

La fotointerpretación suele restringirse a la evaluación de tipos forestales, siendo dificultosa la identificación de especies debido a la gran diversidad, aún en pequeños sectores. Los pasos a seguir en la interpretación son similares a los vistos para zonas templadas, pero, en zonas tropicales, resulta más adecuada la utilización del concepto de fisiografía que integra no solo a las comunidades vegetales sino también a las geoformas, las orientaciones del relieve, los suelos, las formaciones geológicas, el clima y las actividades humanas (usos del suelo).

El fotoanálisis de la vegetación se basa en el diámetro y densidad de copas (textura), la altura de los árboles y la cantidad de estratos verticales, las características del sitio, la composición específica y de edades (tono y color).

La densidad de copas del dosel superior puede indicar la cantidad de madera disponible. La identificación de especies muchas veces no es factible debido a la elevada diversidad y modelo irregular de crecimiento. Los diámetros de copa suelen estar correlacionados con el diámetro del tronco, pero resulta muy difícil medir la altura de los árboles debido al denso sotobosque. La densidad de los árboles dominantes da una buena aproximación del volumen comercial total. Algunas especies conforman rodales homogéneos, por lo que se muestran en tonos uniformes y con una textura característica.

La cartografía final debe mostrar la distribución de las unidades forestales con mención a la composición específica y a los volúmenes maderables medios. Por otra parte se deben consignar también los caminos, picadas y otras vías de acceso, sitios para ubicar los obradores, zonas para el acopio de los rollos y para las maniobras para los camiones, sectores para ser usados como pistas de aterrizaje o helipuerto.

### 6.7. Patrones de referencia usados en fotointerpretación

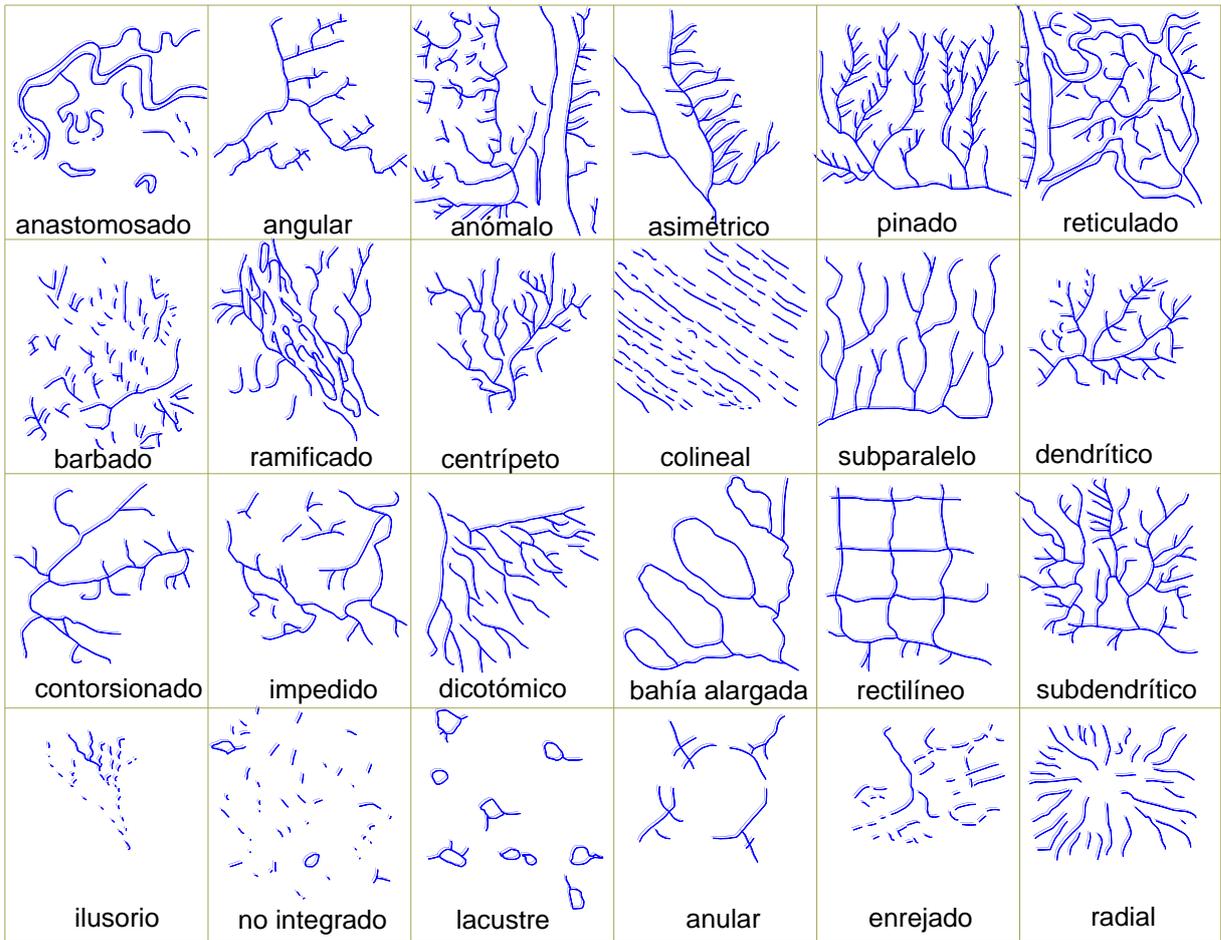


Figura 6.1. Patrones de drenaje (Parvis, 1950).

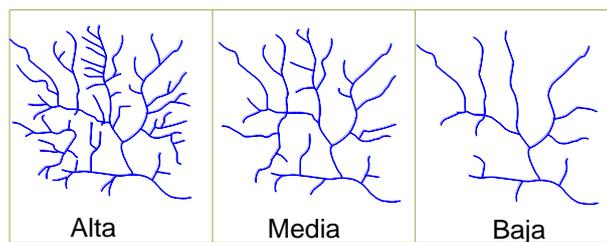


Figura 6.2. Patrones de densidad de drenaje (Way, 1973).

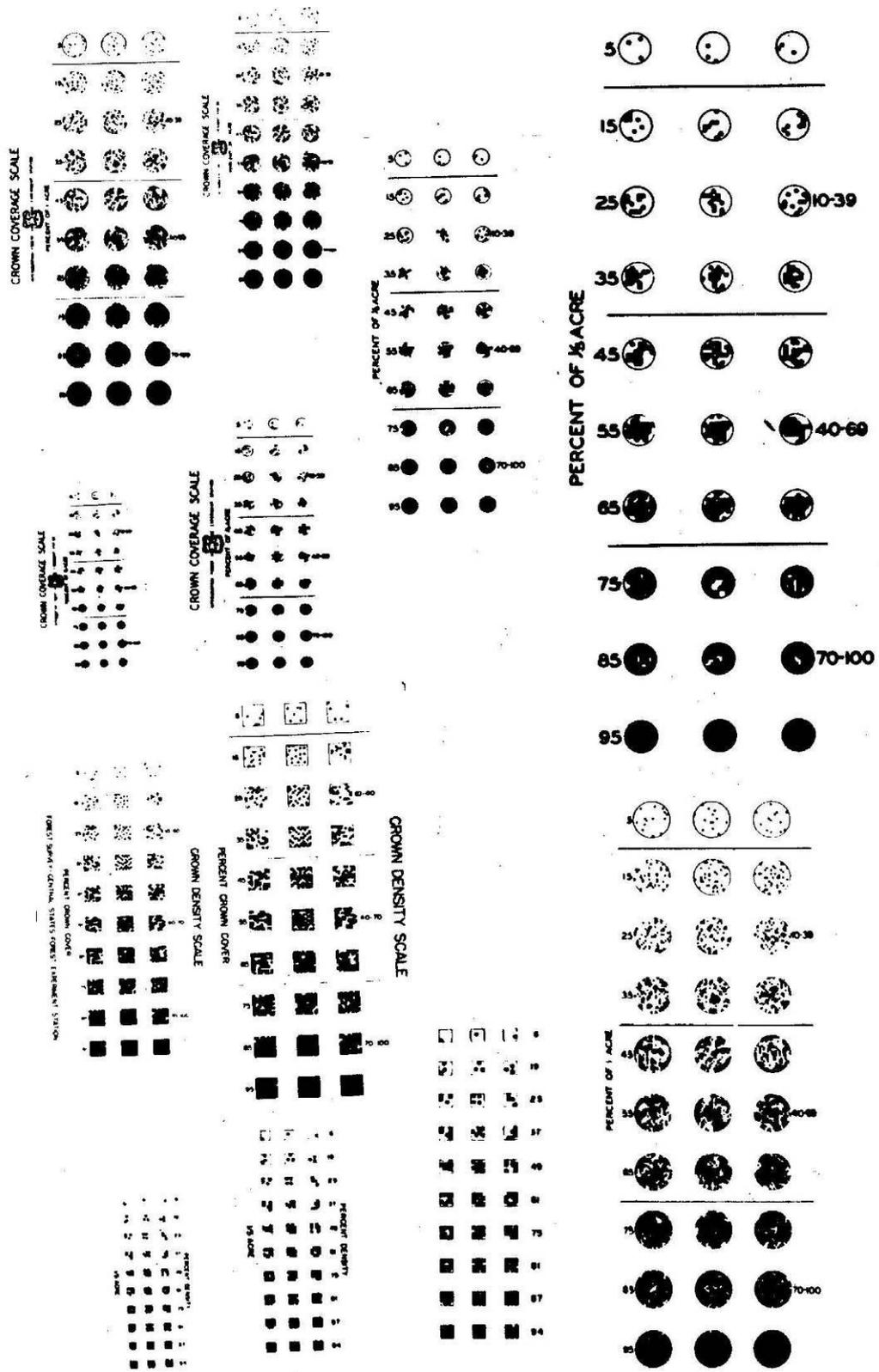


Figura 6.3. Patrones de densidad de copas.

## 7. CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LOS RECURSOS NATURALES

### 7.1. Características espectrales de la vegetación

Del total de radiación solar que llega a las capas superiores de la atmósfera terrestre, sólo un porcentaje es interceptado por los componentes de esta; del remanente, aproximadamente el 1 % corresponde a la radiación ultravioleta (UV), el 39 % a la radiación visible (V) y el 60 % a la infrarroja (IR).

La cantidad de luz que llega a los objetos varía de acuerdo a factores como:

- La intercepción de luz por parte de la atmósfera; ésta depende de la cantidad de vapor de agua y de otras partículas presentes en el medio; y,
- El ángulo de elevación del sol.

Cuando la distancia del sol aumenta, la radiación solar atraviesa una densidad de la atmósfera mayor, con el resultado que la luz obtenida de la superficie del objeto es menor en cantidad y más amarilla en calidad.

La máxima intensidad de luz solar es obtenida por la tierra cuando el sol está en el cenit y es aproximadamente 540 mμ (banda verde), porción del espectro visible donde el ojo humano es más sensible y la clorofila de las hojas reflejan la mayor cantidad de luz (Figura 7.1.).

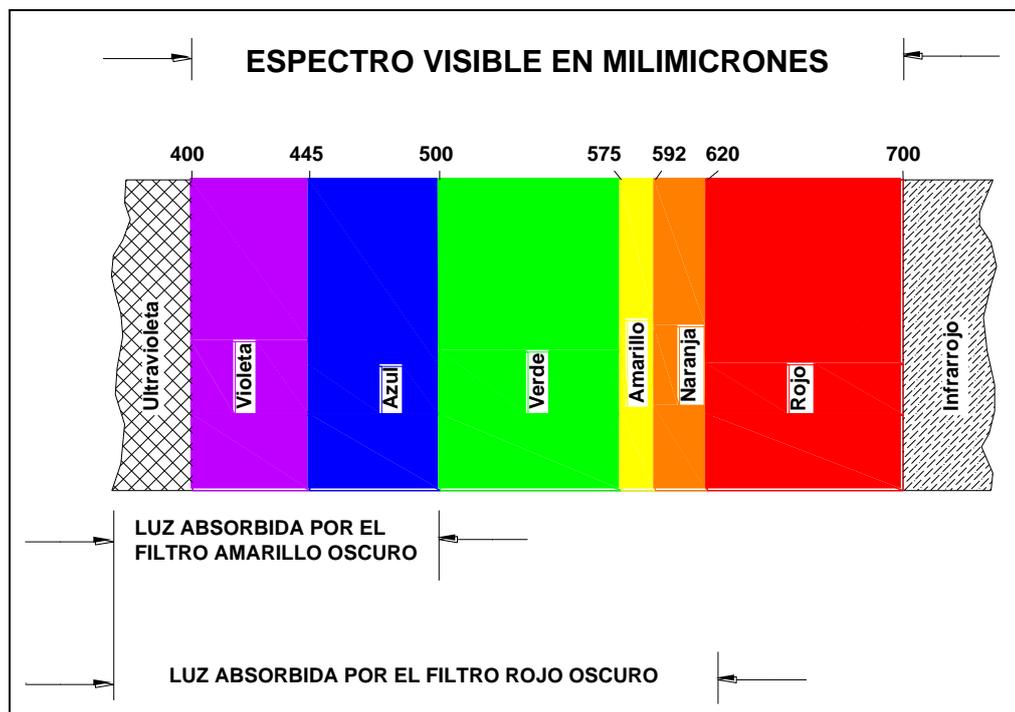


Figura 7.1. Luz solar y acción de los filtros fotográficos.

#### 7.1.1. Iluminación

La apariencia de la vegetación en las fotografías aéreas está determinada, en su mayor parte, por la cantidad y calidad de iluminación recibida y por la proporción de luz reflejada; esta última es función del tipo de hojas, la silueta específica y del patrón de ramas.

En un dosel, las sombras recíprocas hacen que se vean sólo las copas dominantes mientras que las porciones inferiores son sólo iluminadas por la luz dispersa y en algunos casos permanecen ocultas.

Las fotografías aéreas se deben tomar con el sol alto (medio día), así la gran mayoría de las copas quedan iluminadas.

### **7.1.2. Reflexión**

Se refiere a la radiación regresada por una superficie sin cambiar la frecuencia original de la onda electro magnética.

#### ***Factor de reflexión***

Es la relación entre la energía reflejada por un cuerpo y la energía incidente.

#### ***Reflexión espectral***

Es la reflexión en una porción específica del espectro electromagnético, por ejemplo en el intervalo del IR.

La apariencia de un objeto en las fotografías depende de la cantidad relativa de las diferentes porciones de espectro reflejadas por este, también de la iluminación que recibe, además de la hora del día y la condición de la atmósfera, dando como resultado que el tono y color de objetos similares variará.

La cantidad de luz reflejada por las hojas depende de la concentración de clorofila, la cual está influenciada por la humedad, nutrientes disponibles, temperatura, edad, localización geográfica, ángulo de incidencia, posición del árbol en relación con la cámara y el sol, tejidos de la planta, etc.

Los rayos IR son fuertemente reflejados por la estructura esponjosa del mesófilo y no interactúan con los cloroplastos; la luz verde es en su mayor parte reflejada por los cloroplastos mientras que la luz azul y roja es altamente absorbida por los cloroplastos para la fotosíntesis. (Figura 7.2.).

En el follaje seco las características de reflexión cambian. Además, la reflexión espectral de una especie cambia con el progreso de la estación.

Los tonos pueden variar también por otros factores como ser: patrón de ramas, árboles con disposición de hojas horizontales tienen tonos más claros que los de hojas pendientes.

Las especies vegetales de hojas lustrosas se muestran en tonos más claros en la fotografía. Por su parte, los árboles de copas alargadas consecuentemente producen sombras más largas y aparecen más oscuros que los árboles con copas menos profundas.

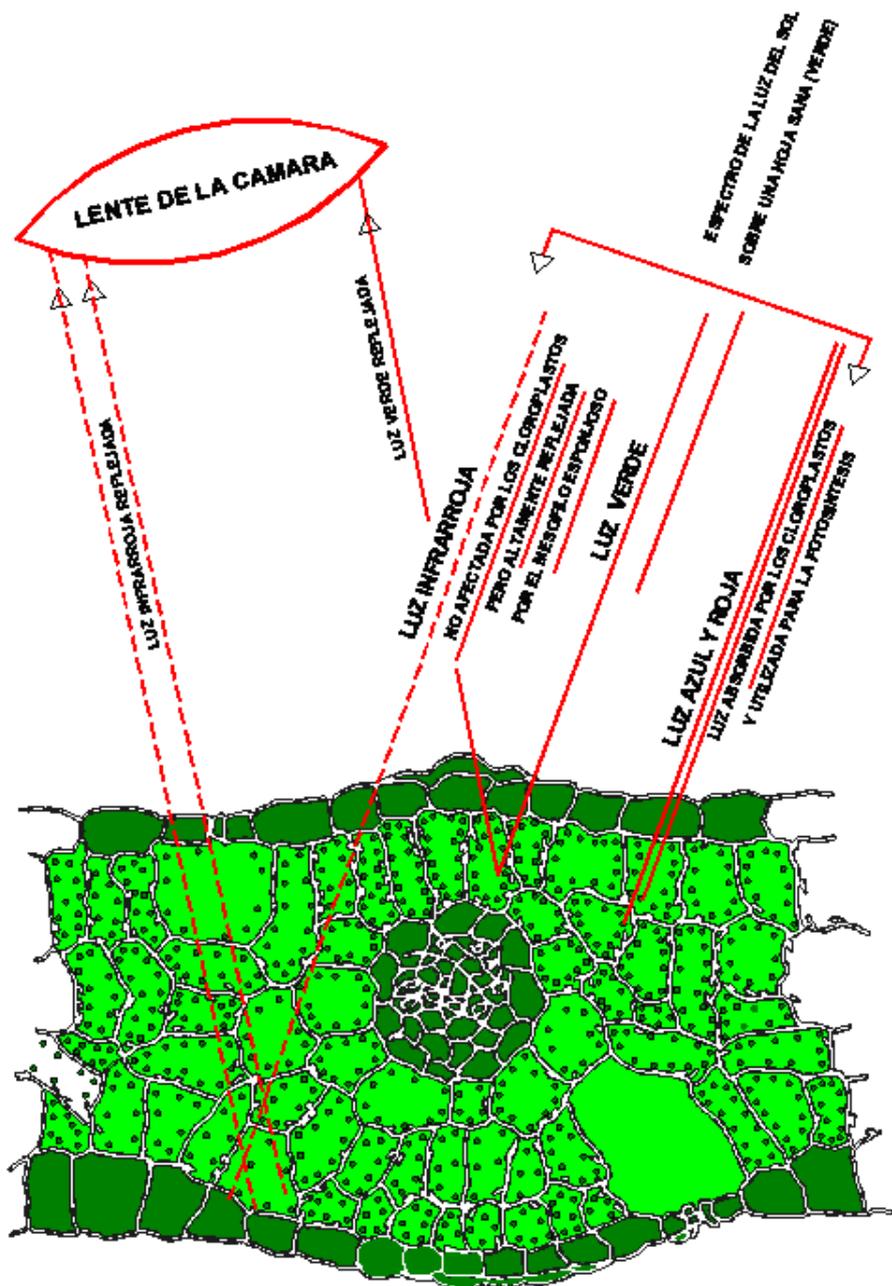


Figura 7.2. Corte esquemático de una hoja y su comportamiento a la radiación.

Las coníferas, por sus hojas aciculares, tienden a absorber más luz y aparecerán en tonos más oscuros que las latifoliadas.

Las coníferas en general dan menos reflexión que las latifoliadas, tanto en el verde como en el infrarrojo (Figura 7.3.).

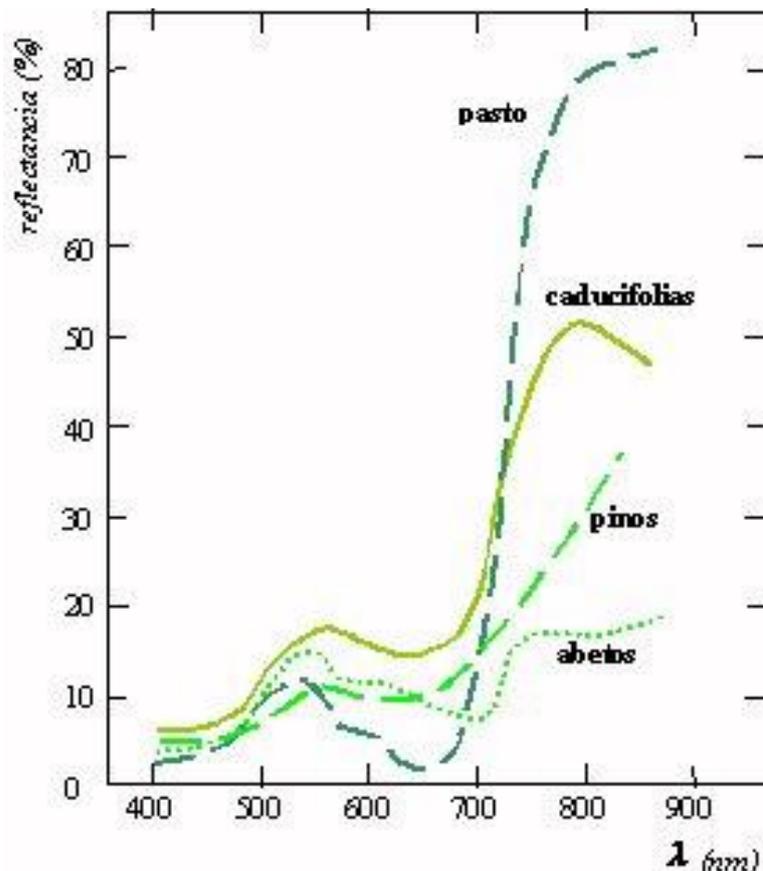


Figura 7.3. Curvas de reflexión de pasto, latifoliadas o caducifolias y coníferas (pinos y abetos).

### 7.1.3. Respuesta espectral de la vegetación

La Figura 7.4. representa la respuesta espectral típica de una vegetación verde sana, e indica la porción reflectiva del espectro electromagnético desde 0,4 a 2,5  $\mu$ . Esta se puede dividir en tres regiones bien diferenciadas, cuya separación está basada en interacciones energía-materia.

Las hojas reflejan, absorben y transmiten la radiación incidente; estos procesos que dependen de: la cantidad y tipo de pigmentación, las características histológicas, el contenido de humedad en el follaje, dan origen a diferentes gráficas de reflectancia espectral o "firmas espectrales" características para cada especie vegetal.

Las tres regiones fundamentales de respuesta espectral son:

- Desde 0,5 $\mu$  y hasta 0,75 $\mu$ . Zona reflectiva del visible donde predomina la influencia de la pigmentación.
- Entre 0,75 y 1,35 $\mu$ . Zona del infrarrojo cercano que se caracteriza por la alta reflectancia y baja absorción, afectada considerablemente por la estructura interna de la hoja.
- Entre 1,35 y 2,5  $\mu$ . Influenciada en parte por la estructura interna de la hoja y fundamentalmente por la concentración de agua en los tejidos.

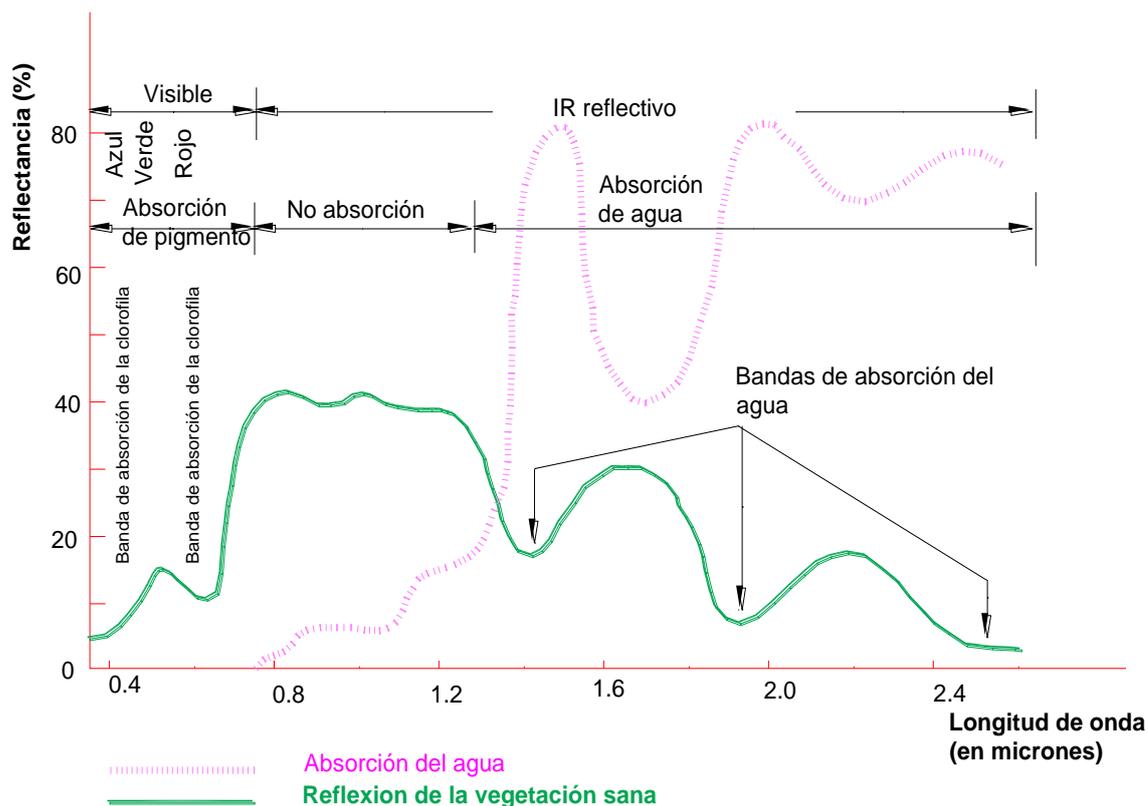


Figura 7.4. Tres regiones fundamentales de respuesta espectral en relación a la reflectancia de una hoja. (Johnson, 1969).

### 7.1.3.1. Pigmentación de las hojas

En la zona del espectro visible, los pigmentos absorben, en el rango del azul ( $0,45\mu$ ) y del rojo ( $0,65\mu$ ), la mayor parte de la energía que llega a la hoja (70 a 90%); mientras que en la zona del verde ( $0,55\mu$ ), la clorofila refleja solo una porción de la energía incidente (20%). Esta última reflexión se produce entre las dos bandas de absorción de la clorofila. Muy poca cantidad es transmitida (ver Figura 7.5).

Los pigmentos controlan la respuesta espectral en la porción visible del espectro. Generalmente la clorofila es el pigmento dominante, pero como se observa en la fig. 4.2.6 otros pigmentos pueden ocasionar diferencias en la reflectancia en la región visible del espectro.

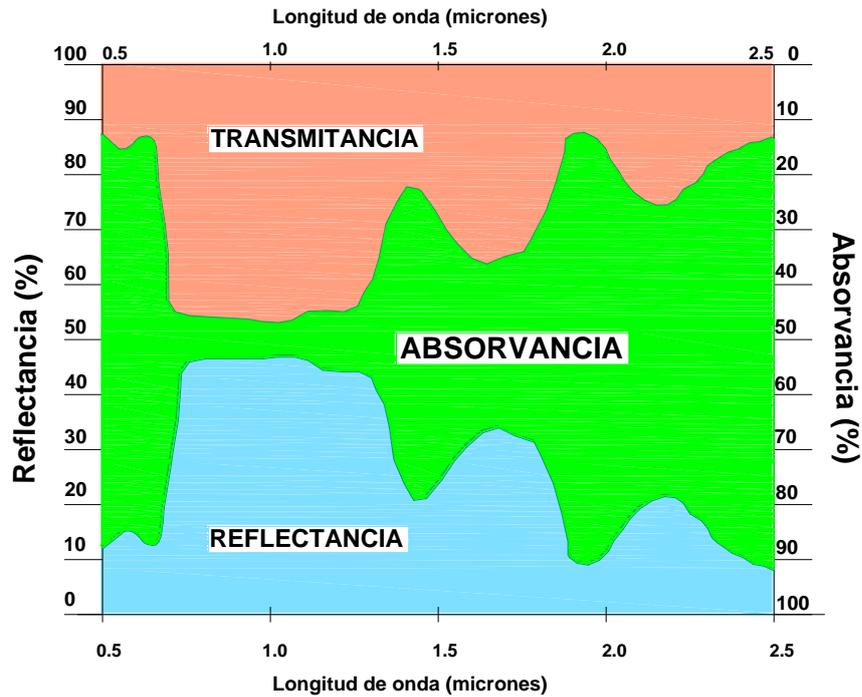


Figura 7.5. Curvas de reflectancia, absorvancia y transmitancia.

El coleo se caracteriza por tener una misma estructura interna y contenido de humedad en toda la hoja, pero la pigmentación es diferencial según sectores de la misma. Esto determina diferentes niveles de reflectancia en la zona de la luz visible y similar configuración de la firma espectral en las porciones del infrarrojo cercano y medio. Ver Figura 7.6.

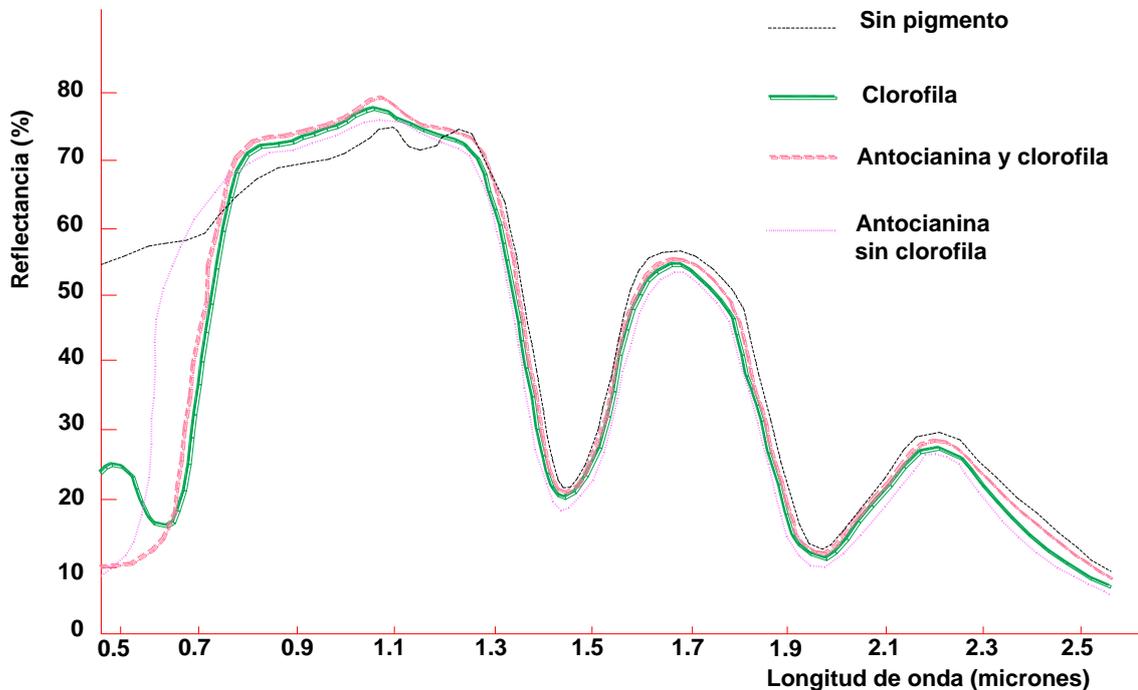


Figura 7.6. Reflectancia espectral de la hoja de coleo.

La en color verde representa la parte de la hoja con concentración de clorofila y muestra un pico de reflectancia en 0,55  $\mu$  que luego baja en el rojo (0,65  $\mu$ ). La parte blanca de la hoja

de coleo, sin aparente pigmentación (línea punteada), tiene alta reflectancia entre 0,5 y 0,9  $\mu$ . Todas las partes de las hojas tienen respuestas similares entre 0,9 y 2,6  $\mu$ .

Las antocianinas, al ser pigmentos que reflejan en la zona del anaranjado y rojo, muestran un incremento en la reflexión entre el 0,55 y 0,7  $\mu$ .

#### **7.1.3.2. Estructura interna de la hoja**

En la región del IR cercano (0,72 a 1,3  $\mu$ ) la energía es casi totalmente reflejada o transmitida a través de las hojas, sólo pequeñas porciones de energía son absorbidas.

El alto nivel de reflectancia es controlado por la estructura interna o histológica de la hoja ya que aproximadamente la mitad de la energía que alcanza la hoja es transmitida y la otra mitad es reflejada en esta zona espectral. Ver Figura 7.5.

#### **7.1.3.3. Estado de maduración de la hoja**

Las hojas jóvenes poseen mesófilo compacto con células protoplasmáticas pequeñas, o sea pocos intersticios en el mesófilo; por su parte, las hojas desarrolladas son lacunosas (estructura del mesófilo débilmente ligada con células vacuoladas esponjosas) y dejan mucho espacio libre.

La hoja esponjosa tiene 5 % menos reflectancia en el visible que la hoja compacta, pero un 15 % mayor en el infrarrojo. El estado esponjoso de la hoja madura aumenta la reflectancia en el infrarrojo por la presencia de mayor cantidad de espacios intercelulares.

#### **7.1.3.4. Contenido de humedad de la hoja**

En la región espectral del IR medio (1,3 - 3  $\mu$ ), la energía que no es absorbida por las moléculas de agua existentes en la hoja, es reflejada como se ve en la Figura 7.7. La cantidad de energía absorbida es función del contenido de agua en la hoja y espesor de la misma. Así, a medida que la hoja envejece el contenido de humedad disminuye, provocando aumentos en la reflectancia no sólo en las bandas de absorción del agua sino también entre ellas.

Como se observa en la Figura 7.7 la disminución de los picos de absorción del agua son significativos cuando el contenido de humedad no supera el 54%. El contenido total de agua de la hoja controla la reflectancia en el infrarrojo medio. El agua absorbe la mayor parte de la energía incidente en esta porción del espectro.

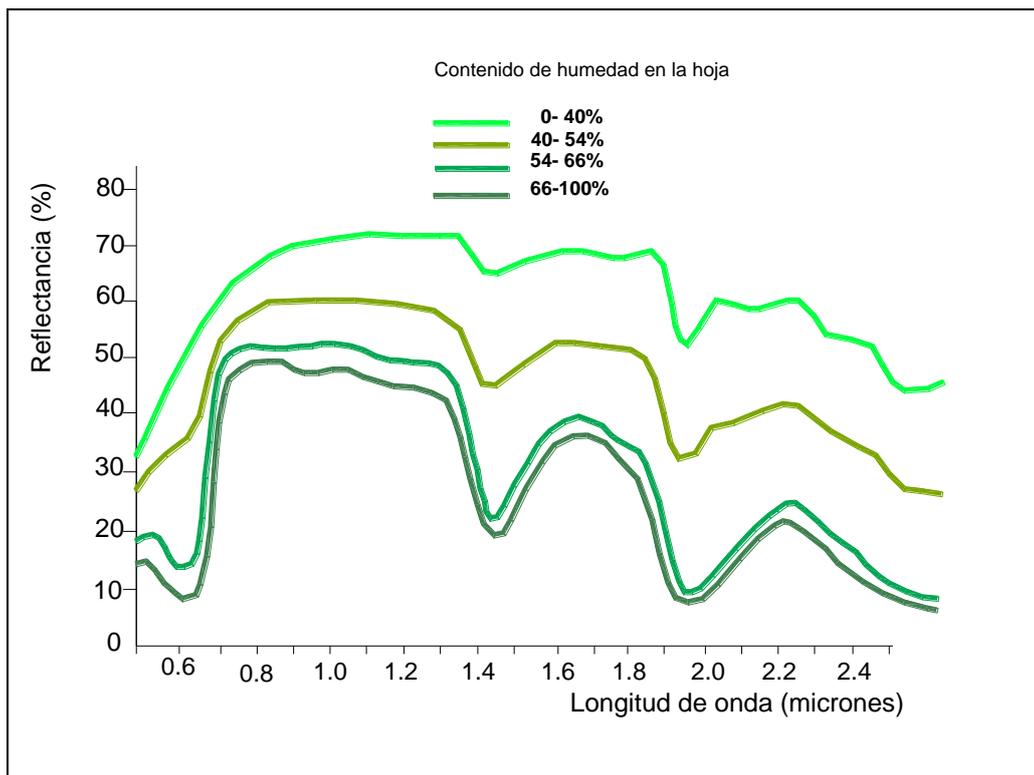
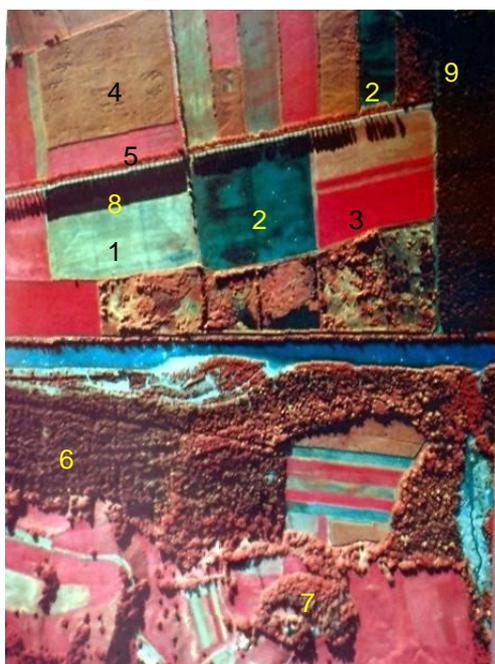


Figura 7.7. Efecto del envejecimiento en la hoja de maíz.

Debe quedar claro que las diferentes especies de vegetación pueden tener características espectrales similares en una determinada etapa de crecimiento, por ello es importante el estudio de la variación temporal de las distintas especies con fotografías aéreas IR (Figura 7.8.) o bien con barreadores multispectrales a fin de evaluar el momento más oportuno para la discriminación.



- 1: Suelo desnudo seco;
- 2: Suelo regado, en partes aún saturado de agua;
- 3: Cultivo en pleno vigor;
- 4: Cultivo con el ciclo cumplido;
- 5: Cultivo en incipiente desarrollo;
- 6: Bosque de coníferas (rojo oscuro);
- 7: Bosque de latifoliadas (rojo claro);
- 8: Faja de suelo recientemente regado;
- 9: Bosque alto de coníferas muy oscuro debido a las sombras proyectadas por las copas.

Es evidente que el sol está muy bajo ya que la sombra proyectada por las cortina forestales cubren parte del camino o de las parcelas agrícolas.

Figura 7.8. Fotografía en infrarrojo color. Tomado de: Folleto Wild.

## 7.2. Características espectrales de los suelos

La luz del sol que llega a la superficie del suelo es reflejada, absorbida o transmitida, en función de la composición que integra la mezcla compleja de materiales orgánicos e inorgánicos con diferente comportamiento ante la energía.

Las curvas de reflectancia espectral de los suelos son menos complejas que las correspondientes a la vegetación; esto se debe a que los suelos están integrados por materiales inertes con estructuras más estables.

Una de las características sobresalientes de los suelos con bajo contenido de humedad es que el nivel de reflectancia aumenta con el incremento de la longitud de onda, esto para el rango del visible e infrarrojo cercano y medio (0,4 – 1,6  $\mu$ ). Ver Figura 7.9.

Los factores que influyen marcadamente la respuesta espectral del suelo son:

Duración	Factor
Permanentes	Textura
	Contenido de materia orgánica y de óxido de hierro
Temporarios	Contenido de humedad
	Aspereza o rugosidad de la superficie

### 7.2.1. Textura del suelo: tamaño de las partículas y retención de la humedad

Se entiende por textura del suelo a las proporciones relativas de partículas de arena, limo y arcilla presentes en una porción del suelo. Partículas menores a 0.02 mm se definen como arcilla, entre 0.02 a 0.05 mm como limo y entre 0.05 y 2 mm como arena.

A medida que el tamaño de la partícula se reduce, la superficie del suelo se hace más lisa y el espacio entre los granos también mengua. El menor tamaño de las partículas disminuye las sombras y sus efectos, mientras que, intersticios más pequeños retiene menos energía dando como resultado y en conjunto una mayor reflexión de la energía recibida.

La reflectividad de los suelos está determinada por el diámetro de los agregados y por la rugosidad de la superficie y no por su composición química.

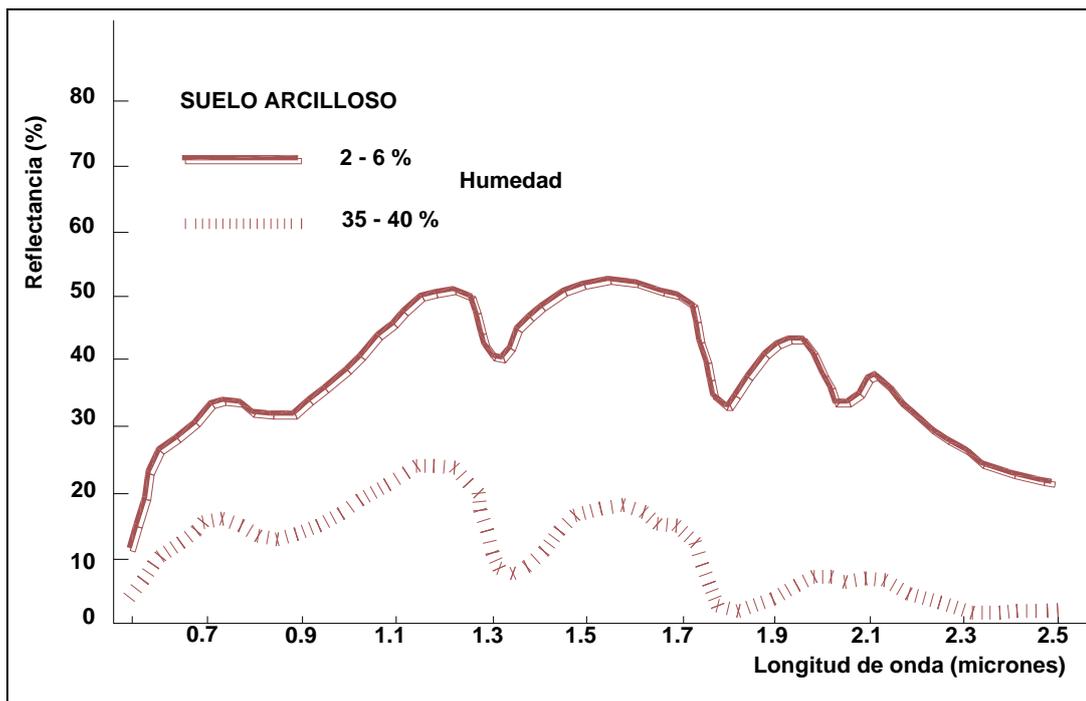


Figura 7.9. Reflectancia en suelos arcillosos con distinto contenido de humedad.

Los suelos arcillosos (textura fina) tienen alta capacidad de retención de humedad y las bandas de absorción de agua son bien discernibles, incluso en suelos semi-secos (Figura 7.9.).

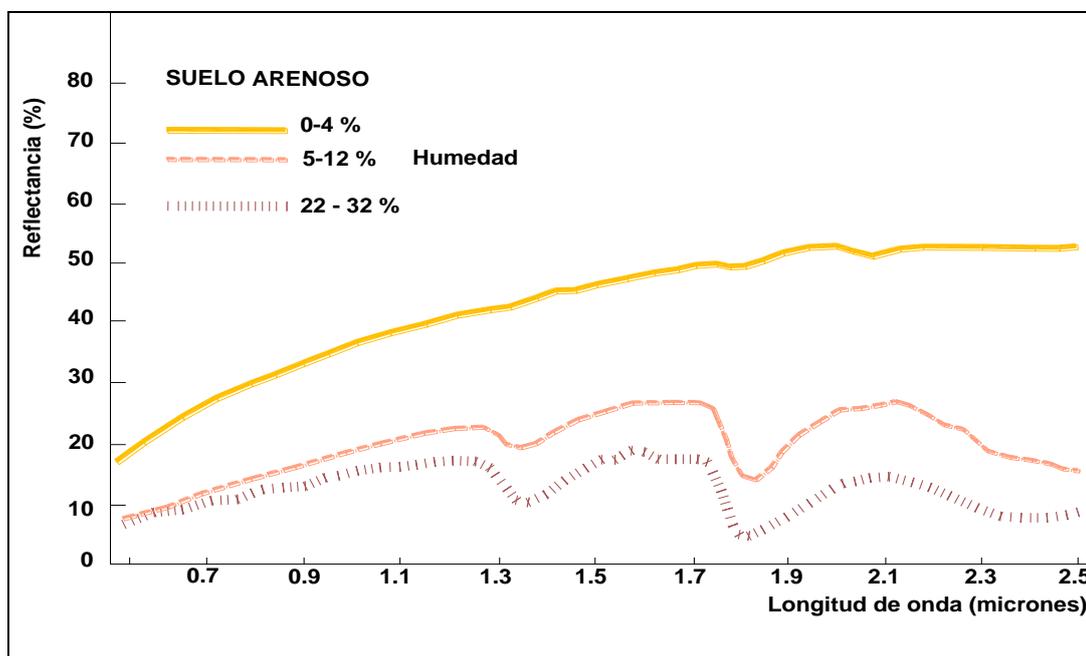


Figura 7.10. Reflectancia en suelos arenosos con distinto contenido de humedad.

En suelos arenosos, los agregados gruesos presentan formas irregulares y exponen superficies complejas con un gran número de espacios intersticiales.

En la Figura 7.10. se destaca que las bandas de absorción del agua, ubicadas en 1.4, 1.9 y 2.7 $\mu$ , son también visibles para los suelos arenosos con alto contenido de humedad.

Pero, las bandas de absorción de agua solo subsisten en suelos arcillosos por su capacidad para retener humedad. Los suelos arenosos conservan muy poco el agua en el perfil, por lo tanto, las bandas de absorción se hacen menos apreciables con el paso del tiempo. En suelos arenosos con bajo contenido de materia orgánica, las bandas de absorción de agua se presentan débiles. Ver Figura 7.11.

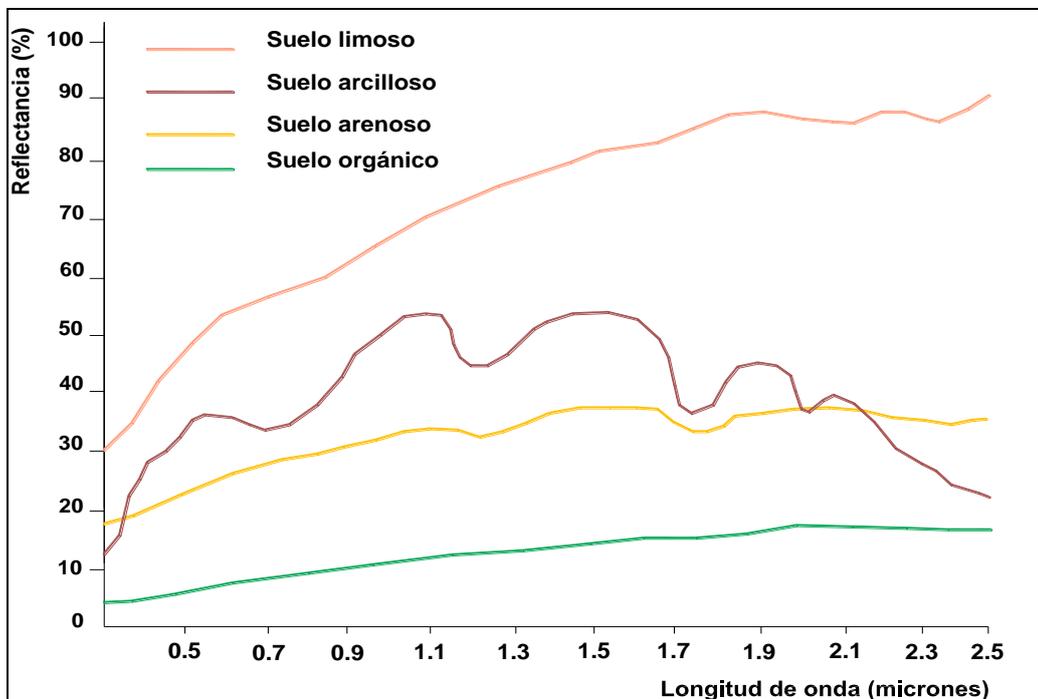


Figura 7.11. Patrones de reflectancia de distintos tipos de suelos

### 7.2.2. Materia orgánica y óxido de hierro

El contenido de materia orgánica (MO) modifica las respuestas espectrales reflectivas. El porcentaje de MO en el suelo varía normalmente entre 0.5 y 5%; a mayor porcentaje de MO mayor será también la absorción. Por el contrario, cuanto menor sea el contenido de MO, mayor será la reflexión y más claro aparecerá el suelo en la fotografía. La cantidad de MO en el suelo depende de la región climática y del grado de oxidación que afecte a la misma. Ver Figura 7.12.

Los suelos de climas húmedos son más oscuros que los de clima seco por el mayor contenido de MO, además de que normalmente se encuentran más húmedos.

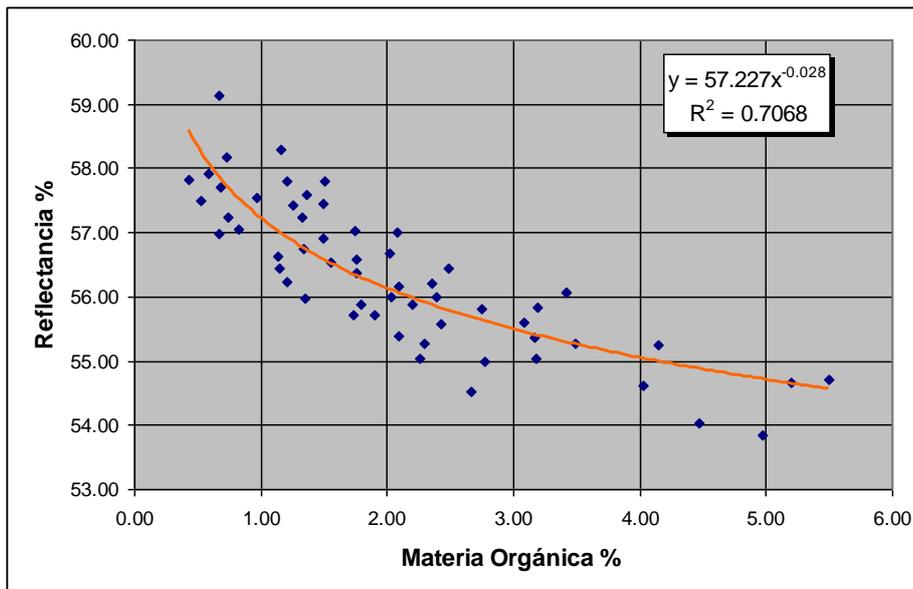


Figura 7.12. Relación entre reflectancia y contenido de materia orgánica.

Cuanto mayor sea la participación del óxido de hierro en el perfil superficial del suelo, menor será la reflexión en la zona del espectro visible.

### 7.2.3. Temperatura del suelo

Al incrementarse la temperatura de un suelo se incrementa también la reflectancia que produce. Los suelos con mayor contenido de MO (más oscuros) absorben más energía que los suelos minerales; reflejaran menos en el visible pero emiten más en longitudes de onda larga (infrarrojo térmico).

Un suelo con alto contenido de humedad se encuentra relativamente más frío debido a la evaporación. Un suelo seco, a pesar de absorber muy poca energía solar no se enfría por evaporación, permanece más caliente y aparece más claro en la imagen fotográfica por reflejar con mayor intensidad.

Un suelo húmedo se presenta relativamente oscuro tanto en la zona reflectiva del espectro como en el IR térmico. Un suelo oscuro en la zona reflectiva pero claro en el IR térmico tiene alto contenido de materia orgánica pero es relativamente seco; finalmente, un suelo que es claro en todo el espectro corresponde un perfil seco y con bajo contenido de materia orgánica.

La presencia de cobertura vegetal altera la temperatura del suelo; por ejemplo, una pastura no afecta demasiado la temperatura media diaria y anual, pero sí reduce su amplitud térmica.

El tamaño de las partículas influye en la transferencia de calor, a medida que aumenta la proporción de arcillas respecto a las arenas, disminuye la conductividad térmica para la fase sólida.

La humedad del suelo y del aire circundante son factores que influyen fuertemente sus características térmicas; con el incremento de la humedad en el suelo, la conductividad térmica aumenta, pero luego dicho crecimiento se hace gradualmente menos marcado ante un mayor aporte de humedad. Con el incremento de humedad aumenta la capacidad calórica del suelo para luego estabilizarse.

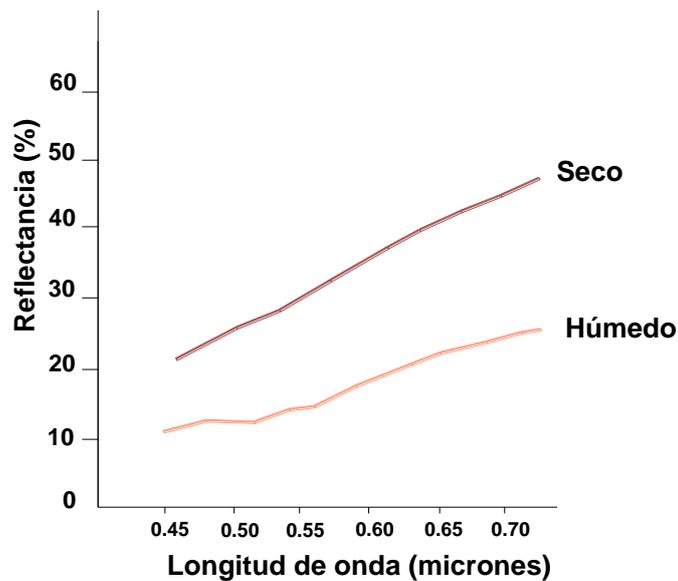


Figura 7.13. Curvas de reflectancia de suelos secos y húmedos.

Durante el día, las variaciones en el intercambio de calor dependen de la radiación solar. El intercambio de calor es despreciable en el amanecer y atardecer. Después del atardecer, el flujo de calor es hacia la atmósfera y varía en función de las capacidades de almacenamiento de calor y conductividad térmica del suelo.

Durante la primavera y el verano el intercambio de energía es positivo, el suelo se calienta, mientras que en invierno el balance se hace negativo.

Las temperaturas mínimas y máximas se retardan con la profundidad. A medida que la aumenta profundidad en progresión aritmética, la amplitud térmica disminuye en progresión geométrica y se amortigua a determinada profundidad.

#### 7.2.4. Estructura y aspereza de la superficie de suelo

Un suelo liso tiene mucho mayor reflectancia que el mismo suelo recién arado. El suelo arado, además de presentar una textura mucho más rugosa, tiene mayor contenido de humedad superficial por inversión del perfil del suelo.

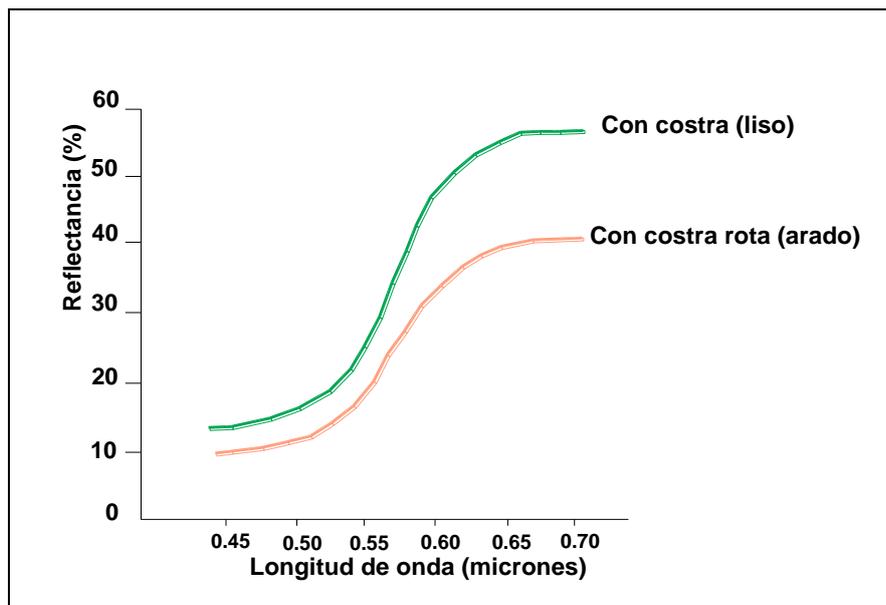


Figura 7.14. Curvas de reflectancia de los suelos con y sin costra.

### 7.2.5. Efecto de la salinidad en los suelos

Tradicionalmente, los manaderos salinos se detectaban con fotografías aéreas blanco y negro y se confirmaban con chequeos en el campo. Posteriormente se recurrió a las fotografías infrarrojo color e imágenes del canal infrarrojo térmico, reduciendo el tiempo y los costos de investigación.

La fotografía infrarroja color es útil para diferenciar vegetación típica de suelos salitrosos o vegetación con “stress” debido a la presencia de sales en superficie.

Las propiedades físicas de los suelos cambian con el incremento en el contenido de sales; estas afectan su temperatura y contenido de humedad, factores que son determinantes para la discriminación en las fotografías e imágenes infrarrojas.

Los manaderos salinos evolucionan a través de una serie de etapas de desarrollo: 1) Suelo húmedo y sin exceso de salinidad; 2) Crecimiento de especies vegetativas tolerantes a la salinidad y al exceso de humedad; y, 3) Aparición de costras salinas.

Las imágenes IR térmico son importantes para ubicar manaderos incipientes (1ª etapa), mientras que las fotografías IR color lo son para detectar el 2º y 3º nivel de salinización.

## 7.3. Características espectrales del agua y la nieve

Como ya se dijera, la absorción y transmisión dependen de las características de los materiales, tanto orgánicos como inorgánicos, y del contenido de agua.

En la Figura 7.15. puede verse que el agua destilada absorbe muy poca energía incidente, principalmente en el sector del azul, incrementándose en el verde y mucho más en el rojo; la dispersión es muy baja dado la casi nula existencia de partículas en el agua destilada.

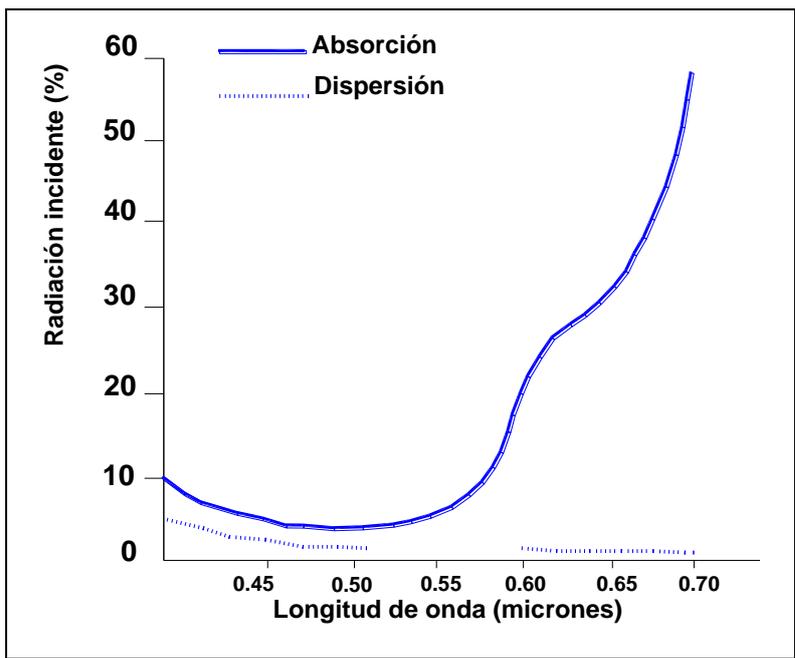


Figura 7.15. Absorción y dispersión de agua destilada.

Por el contrario, la transmitancia de la energía en el visible es muy alta para el agua destilada; pero decrece con el incremento de la turbidez y a mayor longitud de onda, tendiendo a cero en zona de contacto entre el visible y el IR. (Figura 7.16.)

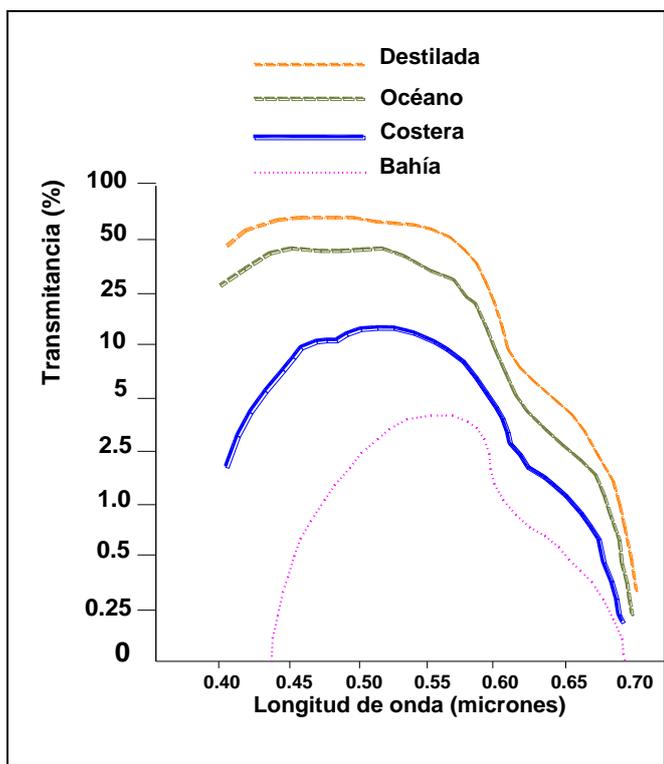


Figura 7.16. Transmitancia espectral del agua con distinto contenido de sales.

Si el agua es limpia y hay poca profundidad, la energía reflejada es función de la arena u otro sedimento que se encuentre en el fondo. Cuanto mayor sea el contenido de sedimentos en el agua, más clara se verá esta debido a la dispersión producida por el material en

suspensión (Figura 7.17); este es el caso del color celeste del agua en la fotografía infrarroja color de la desembocadura del Rhin sobre el lago Constanza (Figura 7.18.).

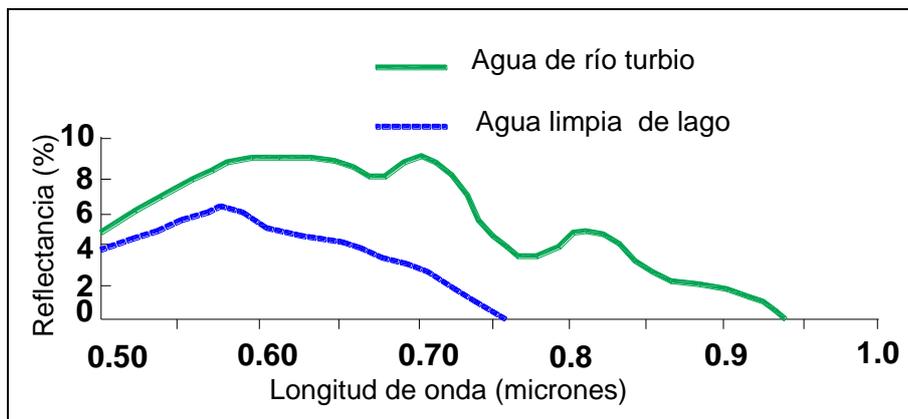


Figura 7.17. Reflectancia de agua limpia y turbia.



Figura 7.18. Desembocadura del Rhin en el lago Costanza. Fotografía infrarroja color. Folleto Wild.

El oleaje producido por el viento en el agua, y de acuerdo a su magnitud, produce los fenómenos de dispersión direccional, difusa o especular; la primera provoca una señal más fuerte, la segunda es más débil y la tercera no es captada por el sensor.

La nieve tiene un comportamiento espectral que no se compara con el de cualquier otro tipo de cobertura del suelo (Figura 7.19.); la reflectancia disminuye abruptamente desde el 100% en los  $0,6\mu$  (rojo) hasta un 5% en los  $1,5\mu$  (infrarrojo cercano) y se acerca a la reflexión nula en el infrarrojo medio.

No hay diferencias significativas de reflexión entre la nieve fresca y la de hace dos días para la zona del visible (Figura 7.19.); pero, después de los  $0,8\mu$  la nieve fresca tiene mayor reflectancia y los “valles” correspondientes a la absorción del agua en el infrarrojo medio son mucho más marcados.

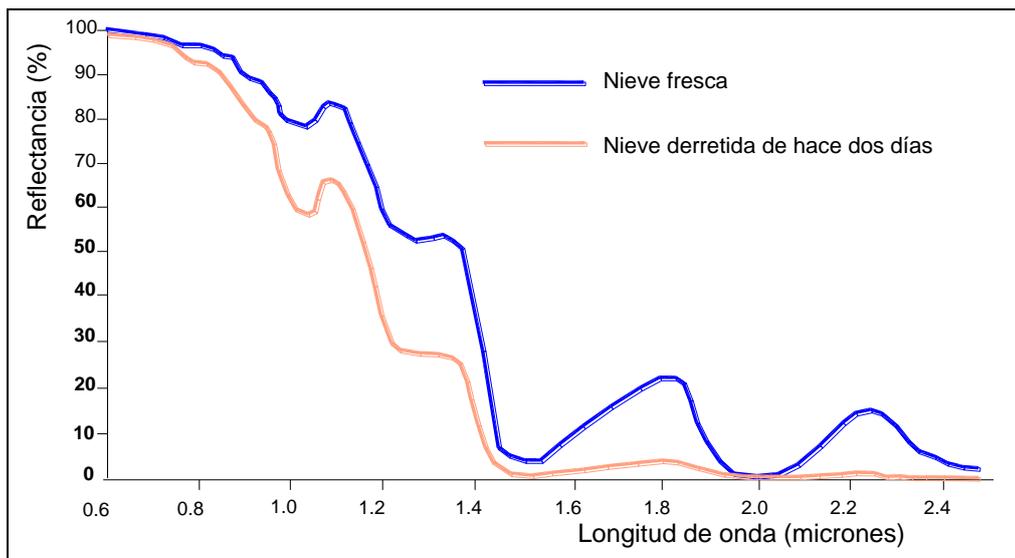


Figura 7.19. Reflectancia espectral de nieve fresca y derretida.

### 7.3.1. Concentración de clorofila en agua

La concentración de clorofila afecta la respuesta espectral del agua; a medida que aumenta la concentración de clorofila en agua, la energía reflejada disminuye en las bandas del azul y del rojo, pero aumenta en la banda del verde. (Figura 7.20.).

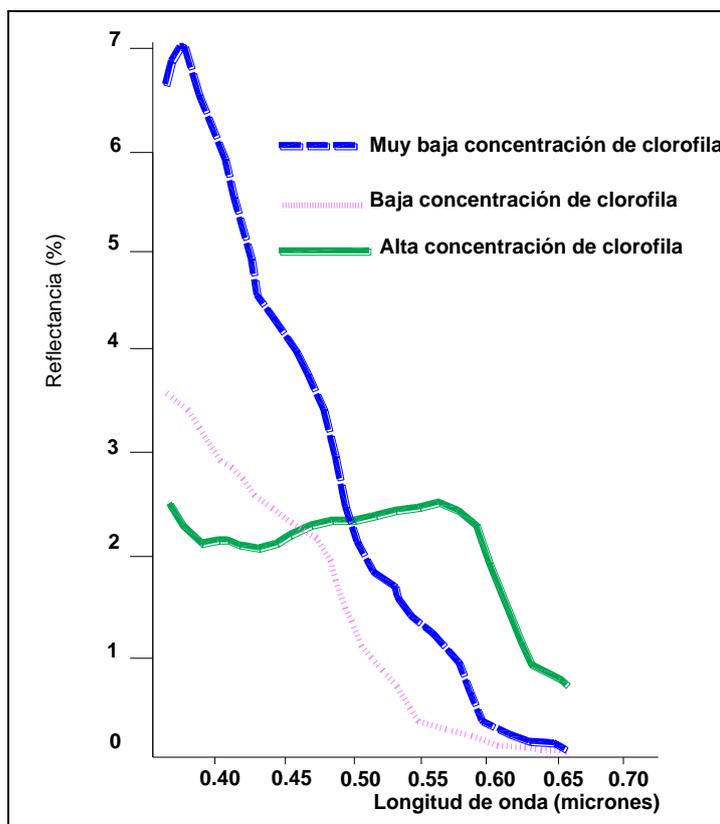


Figura 7.20. Reflectancia espectral del agua oceánica con distinta concentración de clorofila.

Cada vez toma más relevancia el conocimiento de la distribución y comportamiento anual de las algas y plantas acuáticas en los grandes cuerpos de agua dulce o en los océanos. Por un lado, el objetivo es impedir el crecimiento incontrolado, mientras que por el contrario se

busca explotar dichas enormes masas de energía química, renovable, disponible y escasamente usada por el hombre.

Se han utilizado técnicas de percepción remota para estudiar la potencial presencia de algas y su concentración, pero se presentaron algunos inconvenientes:

- algunas especies de algas crecen en aguas relativamente profundas, por lo que las mediciones no resultan indicativas de su producción,
- los ciclos de crecimiento suelen ser muy cortos y pueden ocurrir incluso en lapsos menores a la resolución temporal de los satélites terrestres (por ejemplo 18 días del Landsat 5 TM).

#### 7.4. Reflectancia espectral de algunas coberturas urbanas y rurales

Durante el proceso de fotointerpretación referida a los recursos naturales es necesario reconocer también otros elementos correspondientes a coberturas incorporadas por el hombre. Este es el caso por ejemplo del concreto y el asfalto. (Figura 7.21.).

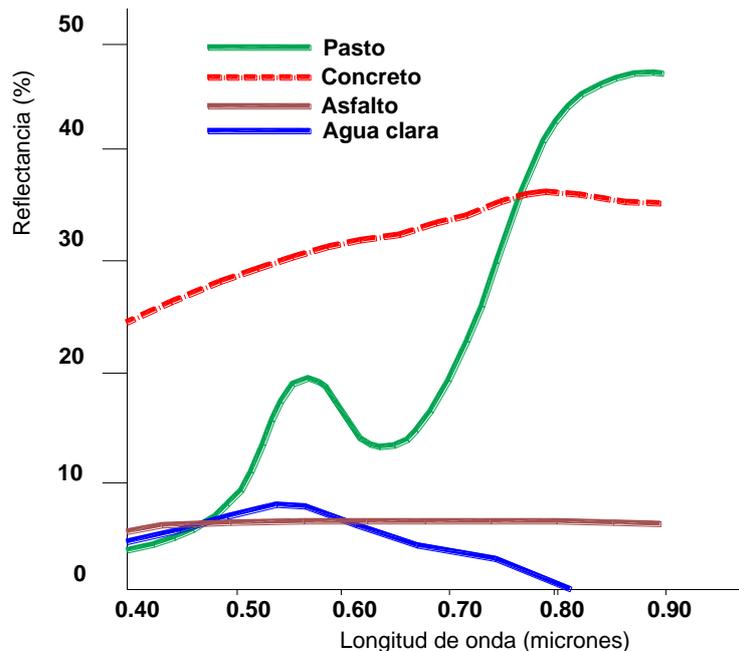


Figura 7.21. Curvas de Reflexión de algunos elementos urbanos y rurales.

Por los materiales constitutivos, la respuesta espectral del concreto y el asfalto son completamente diferentes: el primero presenta un incremento leve en el visible a partir de un 23% de reflexión, en el azul, hasta casi el 35% en el rojo; mientras que el segundo, presenta una reflexión casi constante de aproximadamente el 5% en todo el visible.

Un conocimiento adecuado de las firmas espectrales de las coberturas, tanto las naturales como las implantadas, permite alcanzar muy buenos resultados durante la fotointerpretación.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

### 8.1. Material impreso:

Allum, J. A. E. 1978. Fotografía y Cartografía por zonas. Editorial Paraninfo. Madrid, España.

Chuvieco Salinero, E. 2002. Teledetección Ambiental. Editorial Ariel S. A. Barcelona, España.

Deagostini Routin, D. E. 1970. Introducción a la Fotogrametría - Curso Especial (CIAF), Ministerio de Obras Públicas, Bogotá, Colombia.

Deagostini Routin, D. E. 1971. Fotografías Aéreas y Planeación de Vuelos. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF), Ministerio de Obras Públicas, Bogotá, Colombia.

Deagostini Routin, D. E. 1990. Introducción a la Fotogrametría. Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", Bogotá, Colombia.

Deagostini Routin, D. y F. J. MURILLO. 1972. Instrumentos Fotogramétricos Aproximados. CIAF, Ministerio de Obras Públicas, Bogotá, Colombia.

Glafkides, P. 1953. Química fotográfica. Editorial Omega. Barcelona. 607 pp.

Graham, R. y R. Read. 1990. Manual de fotografía Aérea. Editorial Omega. Barcelona, España.

Instituto Geográfico Militar. 1987. Fotografías Aéreas Verticales y Oblicuas. Elementos Geométricos. Mediciones y Planeamiento de Vuelo. Buenos Aires, Argentina.

KARSUNKE, C. E. 2005. Operación con la cámara fotogramétrica digital aérea DMC. Intergraph, Z/I Imaging. Barcelona, España.

López Cárdenas, F. y V. García Bárcenas. 1968. Aplicación de la Fotografía Aérea a los Proyectos de Restauración Hidrológico-forestal. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Montes, Caza y Pesca Fluvial. Instituto de Investigación y Experiencias. Madrid, España.

López Vergara, M. L. 1971. Manual de Fotogeología. Servicio de Publicaciones de la Junta de Energía Nuclear. Madrid, España.

Molina, Isabel de. 1972. Mediciones y Estimaciones sobre Fotografías Aéreas para Fines Forestales. CIAF. Bogotá, Colombia.

Moncayo Ruiz, F. y W. Astie. 1970. Manual para Uso de Fotografías Aéreas en Dasonomía. Subsecretaría forestal y de la fauna - SAG. Inventario Nacional Forestal, Publicación N° 16. DF, México.

Murillo Forero, J. A. 1973. Fotogrametría Elemental (Notas Complementarias del texto "Introducción a la Fotogrametría" - curso especial) CIAF, Ministerio de Obras Públicas, Bogotá, Colombia.

Murillo Forero, J. A. 1974. Ejercicios Prácticos de Fotogrametría Elemental. CIAF, Ministerio de Obras Públicas, Bogotá, Colombia.

Pinilla, C. 1995. Elementos de teledetección. Rama. Madrid, España.

Roa Moya, J. I. 1976. Principios de Fotogrametría. Texto para pregrado en universidades. Ediciones Alcaraván. Bogotá, Colombia.

Strandberg, C. 1975. Manual de fotografía Aérea. Editorial Omega. Barcelona, España.

Visser, J. 1968. Textbook of Photogrammetry . Volume III - Determination of Control Points - III.2 Radial Triangulation. International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITS). Holanda.

Santos Pérez, L. J. 2006. Cámaras fotogramétricas aéreas digitales: ventajas e inconvenientes. Influencias en la ejecución de cartografía catastral. Revista Catastro, N° 57. [http://www.catastro.meh.es/esp/publicaciones/ct/ct57/04-CATASTRO\\_57.pdf](http://www.catastro.meh.es/esp/publicaciones/ct/ct57/04-CATASTRO_57.pdf).

## 8.2. Páginas de Internet:

Axis Communications. 2009. Sensores CCD y CMOS. [http://www.axis.com/products/video/camera/ccd\\_cmos.es.htm](http://www.axis.com/products/video/camera/ccd_cmos.es.htm).

Barros P. y A. Bravo, 2001. Libros maravillosos. Como funciona. Cap. 27. <http://www.librosmaravillosos.com/comofunciona/comofunciona27.html>.

Boudaud, L. y P. Renaud. 2008. La vida a través de la lente. Diafragma. <http://dancl.wordpress.com/2008/01/28/algunos-terminos-para-recordar/>

[http://es.wikipedia.org/wiki/CCD\\_\(sensor\)](http://es.wikipedia.org/wiki/CCD_(sensor)).

<http://www.stereocarto.com/es/productos/producto.php?id=10>

<http://www.wikipedia>

Malacara, D. 1997. Óptica tradicional y moderna. III la metrología óptica. México, D.F. ISBN 968-16-5226-6. [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/084/htm/sec\\_6.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/084/htm/sec_6.htm)

Mapping Interactivo. 2006. Cámaras Fotogramétricas Aéreas Digitales. Ventajas e Inconvenientes. Influencias en la Ejecución de Cartografía Catastral. Geocampus. Cursos de sistemas de información geográfica por Internet. ISSN: 1.131-9.100. [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1345](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1345).

Palazzesi, A. 2006. CCD vs. CMOS. <http://www.neoteo.com/ccd-vs-cmos.neo>.

Westland, S. 2001. Cómo funciona el ojo humano. <http://www.gusgsm.com/book/export/html/122>.