

# Índice general

<b>PREFACIO</b>	17
<b>Tema 0. HISTORIA DE LA TELEDETECCIÓN</b>	21
0.1. Introducción . . . . .	23
0.2. Cuestiones . . . . .	23
0.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	26
1. Orígenes bélicos de la teledetección . . . . .	26
2. Primeras técnicas de adquisición de imágenes . . . . .	28
3. Primeras plataformas elevadas para adquirir imágenes . . . . .	30
4. Orígenes de la transmisión digital de imágenes. . . . .	32
5. Primera imagen de la Tierra desde el espacio . . . . .	34
6. La vieja fotografía analógica en teledetección . . . . .	36
7. Las agencias de teledetección . . . . .	37
8. La teledetección en España . . . . .	38
9. Los primeros estudios planetarios por Teledetección . . . . .	40
10. El primer satélite científico español . . . . .	42
0.4. Conceptos importantes . . . . .	44
0.5. Bibliografía . . . . .	45

<b>Tema 1. PUNTOS DE VISTA. PLATAFORMAS</b>	<b>49</b>
1.1. Introducción . . . . .	51
1.2. Cuestiones . . . . .	51
1.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	55
1. Imagen proyectiva . . . . .	55
2. Panoramas: Google Street View . . . . .	57
3. Estereoscopía . . . . .	59
4. Ortoforrectificación y ortofotografías. . . . .	61
5. Vehículos aéreos no tripulados. . . . .	62
6. Órbitas de satélites: ecuatoriales y heliosíncronas . . . . .	64
7. Órbitas de satélites: polares. . . . .	67
8. Estereoscopía desde satélite . . . . .	69
9. Misiones espaciales y su continuidad. . . . .	72
10. Satélites meteorológicos . . . . .	73
1.4. Conceptos importantes . . . . .	76
1.5. Bibliografía . . . . .	79
<b>Tema 2. MÉTODOS DE MEDIDA</b>	<b>85</b>
2.1. Introducción . . . . .	87
2.2. Cuestiones . . . . .	87
2.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	91
1. Medidas y sus errores . . . . .	91
2. Niveles digitales . . . . .	94
3. Calibración. . . . .	96
4. Error de la formación de la imagen . . . . .	98
5. Georreferenciación . . . . .	101

6. Resoluciones de un sensor . . . . .	103
7. Resolución espacial . . . . .	106
8. Resolución espectral . . . . .	107
9. Bandas de un sensor . . . . .	109
10. Medida por radar . . . . .	110
2.4. Conceptos importantes . . . . .	112
2.5. Bibliografía . . . . .	116
<b>Tema 3. FÍSICA DE LA VISIÓN HUMANA</b>	<b>119</b>
3.1. Introducción . . . . .	121
3.2. Cuestiones . . . . .	121
3.3. Respuestas . . . . .	124
1. Estructura del ojo humano . . . . .	124
2. El sistema óptico del ojo . . . . .	125
3. La percepción del color . . . . .	128
4. La percepción de la luminosidad . . . . .	131
5. La adaptación a la luz . . . . .	132
6. El punto ciego . . . . .	134
7. Descripción cuantitativa de la luz . . . . .	135
8. Descripción cuantitativa de la percepción luminosa . . . . .	137
9. Modelos de color . . . . .	138
10. Otros modelos de color . . . . .	140
3.4. Conceptos importantes . . . . .	143
3.5. Bibliografía . . . . .	145

<b>Tema 4. SENSORES DE EJEMPLO</b>	<b>149</b>
4.1. Introducción . . . . .	151
4.2. Cuestiones . . . . .	151
4.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	156
1. Espectrorradiometría de campo . . . . .	156
2. Bibliotecas de espectros . . . . .	158
3. Bandas más usadas en sensores multiespectrales. . . . .	160
4. Acceso a los datos de los sensores. . . . .	161
5. Los sensores del programa Landsat . . . . .	162
6. Los sensores de color oceánico . . . . .	164
7. Los sensores meteorológicos . . . . .	166
8. Los sensores de vigilancia ambiental . . . . .	167
9. Los sensores radar . . . . .	168
10. Los sensores aerotransportados. . . . .	171
4.4. Conceptos importantes . . . . .	173
4.5. Bibliografía . . . . .	175
<b>Tema 5. IMAGEN DIGITAL</b>	<b>181</b>
5.1. Introducción . . . . .	183
5.2. Cuestiones . . . . .	183
5.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	187
1. Canales de una imagen digital . . . . .	187
2. Adquisición de una imagen digital . . . . .	190
3. Escala de una imagen . . . . .	191
4. Almacenamiento de una imagen. . . . .	193
5. Formatos de imagen fotográfica . . . . .	195

6. Formatos de imagen de teledetección. . . . .	197
7. Composición de bandas RGB . . . . .	200
8. Máscaras binarias. . . . .	201
9. Digitalización de una imagen. . . . .	204
10. Productos meteorológicos en color . . . . .	206
5.4. Conceptos importantes . . . . .	210
5.5. Bibliografía. . . . .	212
<b>Tema 6. TRANSFORMACIONES DE LAS IMÁGENES</b>	<b>217</b>
6.1. Introducción . . . . .	219
6.2. Cuestiones . . . . .	220
6.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	224
1. Transformaciones globales . . . . .	224
2. Transformaciones globales lineales . . . . .	226
3. Aritmética de bandas. . . . .	228
4. Aritmética de bandas: ejemplos . . . . .	229
5. Índices espectroscópicos . . . . .	231
6. Máscaras lógicas/binarias. . . . .	234
7. Filtrado de una imagen . . . . .	235
8. Interpolación. . . . .	237
9. Detección de bordes . . . . .	238
10. Realce local . . . . .	240
6.4. Conceptos importantes . . . . .	241
6.5. Bibliografía. . . . .	243

<b>Tema 7. ESTADÍSTICA DE LAS IMÁGENES</b>	<b>247</b>
7.1. Introducción . . . . .	249
7.2. Cuestiones . . . . .	249
7.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	253
1. Transformación del histograma . . . . .	253
2. Interpretación del histograma . . . . .	254
3. Correlación entre bandas . . . . .	257
4. Decorrelación de bandas . . . . .	258
5. Componentes principales . . . . .	261
6. Clasificación supervisada . . . . .	262
7. Distancias entre bandas de píxeles . . . . .	264
8. Clasificación no supervisada . . . . .	266
9. Validación de una clasificación . . . . .	269
10. Análisis de mezclas espectrales . . . . .	271
7.4. Conceptos importantes . . . . .	273
7.5. Bibliografía . . . . .	275
<b>Tema 8. LA INFORMACIÓN MULTIESPECTRAL VISTA A TRAVÉS DE LA           ATMÓSFERA</b>	<b>279</b>
8.1. Introducción . . . . .	281
8.2. Cuestiones . . . . .	281
8.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	285
1. Fotones y detectores . . . . .	285
2. Magnitudes radiométricas. . . . .	287
3. Radiancia y su significado . . . . .	289
4. Reflectividad. . . . .	290

5. Radiancia espectral . . . . .	292
6. Absorción atmosférica . . . . .	293
7. Dispersión atmosférica . . . . .	295
8. Corrección atmosférica . . . . .	298
9. Corrección por objeto oscuro. . . . .	300
10. Corrección atmosférica 6S . . . . .	302
11. Corrección atmosférica por radiometría de campo . . . . .	305
8.4. Conceptos importantes . . . . .	308
8.5. Bibliografía . . . . .	309
<b>Tema 9. MEDIDA REMOTA DE LA TEMPERATURA</b>	<b>313</b>
9.1. Introducción . . . . .	315
9.2. Cuestiones . . . . .	315
9.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	318
1. La temperatura . . . . .	318
2. Ley de Wien . . . . .	320
3. Ley de Planck . . . . .	321
4. Sensor infrarrojo vs. radiómetro de microondas . . . . .	324
5. Medidas térmicas de la atmósfera . . . . .	326
6. Emisión térmica terrestre . . . . .	328
7. Coeficiente de emisividad. . . . .	330
8. Algoritmos multibanda de temperatura. . . . .	334
9. Inercia térmica . . . . .	335
10. Islas de calor . . . . .	336
9.4. Conceptos importantes . . . . .	339
9.5. Bibliografía . . . . .	340

<b>Tema 10. EL “COLOR” DE LAS CUBIERTAS TERRESTRES</b>	<b>345</b>
10.1. Introducción. . . . .	347
10.2. Cuestiones. . . . .	347
10.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	351
1. Absorción y reflexión . . . . .	351
2. Dispersión y reflexión . . . . .	353
3. Espectro de las nubes . . . . .	356
4. Espectro del hielo y de la nieve . . . . .	359
5. Espectro del suelo . . . . .	362
6. Espectros de minerales . . . . .	365
7. Espectro de la vegetación . . . . .	367
8. Espectros de algas . . . . .	370
9. Transformación <i>tasseled-cap</i> . . . . .	372
10. Índices de vegetación. . . . .	374
10.4. Conceptos importantes . . . . .	376
10.5. Bibliografía . . . . .	378
<b>Tema 11. LA INFORMACIÓN DE LAS ONDAS: EL RADAR</b>	<b>383</b>
11.1. Introducción. . . . .	385
11.2. Cuestiones. . . . .	385
11.3. Respuestas a las cuestiones . . . . .	389
1. Longitud de onda de radar . . . . .	389
2. Resolución espacial . . . . .	391
3. SAR . . . . .	394
4. Formación de una imagen radar . . . . .	396
5. Polarizaciones . . . . .	400

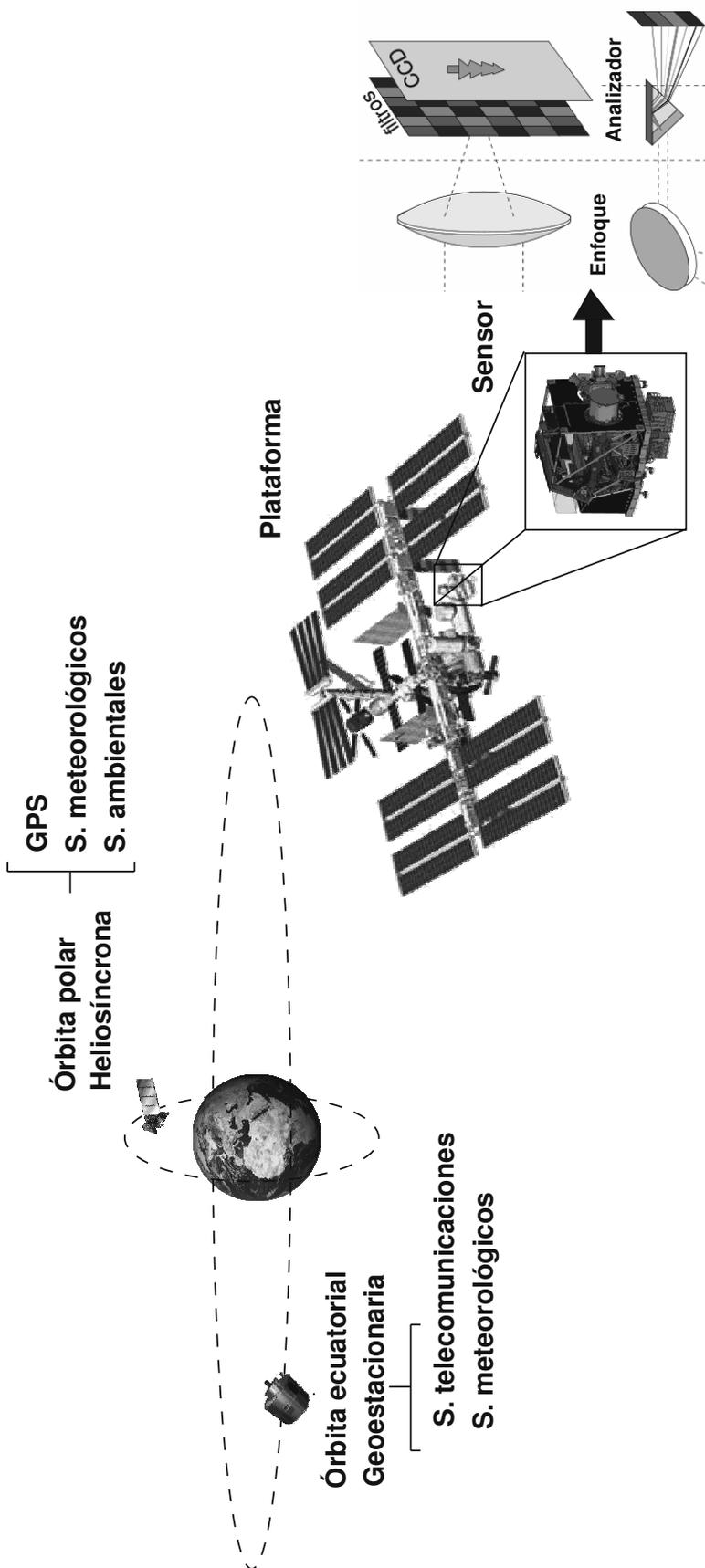
6. Escala decibélica . . . . .	403
7. La SRTM. . . . .	405
8. Altimetría radar . . . . .	409
9. Interferometría radar . . . . .	413
10. Medida del viento por dispersión . . . . .	416
11.4. Conceptos importantes . . . . .	420
11.5. Bibliografía . . . . .	423
<b>Apéndice A. EL PROGRAMA BEAM</b>	<b>427</b>
A.1. La interfaz gráfica: VISAT . . . . .	429
A.2. Apertura de archivos . . . . .	431
A.3. Visualización de bandas . . . . .	433
A.4. Georreferenciación de una imagen . . . . .	435
A.5. Co-localización de dos productos . . . . .	437
A.6. Creación de nuevos productos de trabajo. . . . .	439
A.7. Ejemplos prácticos . . . . .	439
1. Apertura de imágenes y reproyección . . . . .	439
2. Georreferenciación de una imagen . . . . .	441
3. Módulos de Beam y algoritmos estándar. . . . .	443
4. La calculadora de bandas . . . . .	446

## Tema 1

# Puntos de vista. Plataformas

### **GUION-ESQUEMA**

- Teledetección a ras de suelo
- Teledetección aerotransportada
- Teledetección satelital
- Los programas de satélites de teledetección
- Otra teledetección



## 1.1. INTRODUCCIÓN

Este tema trata de los soportes desde los que se lleva a cabo la teledetección. Como se mencionó en el tema sobre la historia de la teledetección, las plataformas de observación han evolucionado históricamente llegando cada vez más alto: desde puntos accesibles a pie sobre el terreno, hasta las órbitas geostacionarias de los satélites meteorológicos (por no mencionar los satélites de exploración planetaria, que también llevan a cabo teledetección). En este tema se tratan estos diferentes puntos de vista.

El punto de vista más próximo es nuestra propia mano o un trípode sosteniendo una cámara de fotografía. Esta sencilla plataforma permite examinar dos de los problemas comunes a todas las plataformas: su orientación y su distancia respecto al objeto remoto que se quiere estudiar. El siguiente paso en altura son las plataformas aerotransportadas. Los aviones ligeros son los más utilizados para adquirir datos de alto detalle (por su poca altura) en fechas programadas y bajo condiciones, hasta cierto punto, controladas. Los aviones presentan el problema de la altura de vuelo y el movimiento (de cabeceo, alabeo y guiñada), que se vuelve a traducir en un problema de distancias y ángulos. Un paso más allá es la teledetección satelital (la más habitual en la actualidad). Los satélites artificiales se mantienen en órbitas alrededor de la Tierra, caracterizadas por su altura e inclinación, que determinan el tiempo de visita. En la actualidad existen diferentes programas espaciales de observación de la Tierra, entre los que se encuentran los de la ESA y la NASA, pero también los de otras agencias nacionales y privadas. Cada programa tiene unos objetivos y unas políticas de distribución de datos, que conviene conocer para escoger los más adecuados para nuestras necesidades.

## 1.2. CUESTIONES

1. Cuando se hace una fotografía de una escena, la relación entre las distancias entre tres objetos sobre la imagen tomada depende de:
  - a) la orientación de la cámara respecto a los objetos
  - b) los aumentos de la cámara
  - c) el anclaje de la cámara sobre un trípode
  - d) no depende de nada: es una razón geométrica que no varía.

2. Si quisiéramos emular con nuestra cámara fotográfica en mano, por la calle, a Google Street View, ¿qué NO necesitaríamos saber de cada fotografía hecha?
  - a) las coordenadas GPS del punto donde fue tomada
  - b) las coordenadas GPS de un punto en la fotografía
  - c) la “focal” de la cámara (que depende del objetivo y del zoom)
  - d) los ángulos de disparo de la cámara: vertical (inclinación) y horizontal (respecto al norte).
  
3. En la la página web de Flickr de la Geophotopedia, se pueden encontrar múltiples fotografías temáticas con una información interesante para hacer “teledetección a ras de suelo”: la fecha y las coordenadas geográficas del lugar desde donde se tomaron y las características de la cámara que las tomó. ¿Bastaría esto para hacer un estudio automático de cambios en una escena entre dos (o más) fotografías? ¿Qué otra información sería necesaria?
  - a) sí, bastaría. No se necesita nada más.
  - b) haría falta identificar manualmente, al menos el mismo punto en las dos imágenes
  - c) haría falta identificar manualmente, al menos dos puntos visibles en ambas imágenes
  - d) hará falta, no sólo identificar manualmente esos dos puntos, sino conocer sus coordenadas geográficas
  
4. Cuando la distancia de un avión o helicóptero al suelo es del mismo orden (¡o incluso menor!) que las alturas en la orografía del terreno, las distancias estimadas por fotografía y las distancias reales son diferentes. Por ejemplo, si un avión sobrevuela un valle, las distancias entre dos puntos:
  - a) se verán mayores si se hallan a lo largo del valle que si se hallasen en sus laderas
  - b) se verán menores si se hallan a lo largo del valle que si se hallasen en sus laderas
  - c) se verán mayores que lo esperado, independientemente de su ubicación en el valle
  - d) se verán menores que lo esperado, independientemente de su ubicación en el valle

5. La última tendencia en teledetección es el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) que sobrevuelan las zonas a estudiar a pocos metros de altura. Teniendo en cuenta el detalle que pueden llegar a dar estos ingenios, ¿cómo cree que se orientan?
- a) con GPS diferenciales
  - b) con IMU electrónicas (como las de los móviles)
  - c) por su orientación relativa a balizas en tierra
  - d) no se orientan: las imágenes se colocan posteriormente por puntos fiduciales.
6. Muchos satélites meteorológicos son satélites geostacionarios, que permanecen siempre sobre el mismo lugar de la Tierra. Por su parte, la mayoría de los satélites de teledetección ambiental son satélites que se desplazan en órbitas polares (o casi polares), lo que hace que no proporcionen vistas continuas de sus objetos de interés. ¿A qué se debe esta elección de órbitas?
- a) a la distancia requerida a la superficie de la Tierra
  - b) a las variaciones de iluminación solar a lo largo del día
  - c) a que las órbitas ecuatoriales están muy llenas de satélites
  - d) a que es más fácil colocar satélites en órbitas polares que en ecuatoriales
  - e) a todas las anteriores
7. Cuando se adquiere una imagen de satélite, entre la información que se nos ofrece está si el satélite se halla en su “paso ascendente” o en su “paso descendente”. ¿Qué quiere decir esto? ¿Y para qué sirve?
- a) que el satélite se está acercando o alejando a una estación de telemetría, por lo que la precisión de su ubicación varía
  - b) que el satélite, en su órbita hacia el punto observado, asciende (hacia el norte) o desciende (hacia el sur) respecto al ecuador, por lo que las líneas superiores de la imagen han sido tomadas en un instante posterior o anterior (respectivamente) al de las inferiores
  - c) que el satélite ha adquirido la imagen mientras “subía” o “bajaba” datos a la estación de recepción en tierra, por lo que informa del tiempo de transmisión

8. Algunos satélites permiten aprovechar el conocimiento preciso de su órbita y la capacidad de sus sensores para tomar imágenes en varias direcciones (hacia delante y hacia atrás de la órbita) para, por estereoscopía, generar modelos digitales de elevación (DEM). Un ejemplo es el sensor japonés ASTER, a bordo del satélite Terra de la NASA, que sigue una órbita polar heliosíncrona a una altitud de unos  $H = 650$  km; con él se ha confeccionado el GDEM, con una resolución espacial (horizontal) de 15 m. El ASTER proporciona imágenes con una diferencia (o resolución) angular de  $20^\circ$ . ¿Cuál será la mejor resolución vertical del modelo digital de elevaciones obtenido?
- a) del orden de decímetros
  - b) del orden de metros
  - c) del orden de decenas de metros
  - d) del orden de metros en el ecuador y decenas de metros sobre los polos
  - e) No hay datos suficientes para estimar la resolución en altura
9. El satélite ENVISAT de la ESA albergaba en su interior muchos instrumentos, que compartían así una infraestructura de lanzamiento, alimentación, telecomunicaciones, etc. El propósito de ENVISAT era proporcionar una descripción comprensiva de la superficie terrestre, continuando con misiones pasadas como los ERS (*Earth Resources Satellite*). Ahora que se ha perdido el ENVISAT, y que la crisis actual ha retrasado el lanzamiento de los Sentinel (los sucesores del ENVISAT), ¿cómo garantiza la ESA la continuidad de los datos que éste proporcionaba?
- a) no la garantiza, es necesario recurrir a otras agencias
  - b) la garantiza a través de otros sensores de otras agencias (tanto de países europeos miembros de la ESA, como de la NASA)
  - c) la ESA disponía de otros satélites de misiones similares a la del ENVISAT que suplen su falta.
  - d) la garantiza suscribiendo acuerdos con agencias privadas.

10. El programa de la agencia europea Eumetsat, dedicado a satélites meteorológicos, contempla dos clases de satélites: los Meteosat (7, 8, 9 y 10) y los Metop (A y B). Si el objetivo de estos satélites es la monitorización del tiempo atmosférico, ¿por qué las dos series de satélites?
- a) los satélites de las dos series llevan sensores distintos que proporcionan información complementaria
  - b) los satélites de las dos series se hallan a diferentes distancias, de modo que proporcionan resoluciones espaciales y temporales complementarias
  - c) la serie Meteosat es continuación de la serie histórica de satélites meteorológicos de la ESA, mientras que los Metop buscan colaborar con los satélites de órbita polar de la NOAA de EE.UU.
  - d) todas las anteriores

### 1.3. RESPUESTAS A LAS CUESTIONES

#### 1. Cuando se hace una fotografía de una escena, la relación entre las distancias entre tres objetos sobre la imagen tomada depende de:

**Respuesta:** *(a) Las relaciones entre las distancias entre objetos en una fotografía dependen del ángulo que forme el plano que los contiene con la dirección de observación de la cámara: si ese plano gira, alguno o algunos de los ángulos del triángulo que definen los tres objetos se abrirá, aparentemente, mientras que otro u otros se cerrarán. Esto cambia las proporciones de las distancias entre objetos.*

Una fotografía nos muestra la proyección de los rayos de luz que llegan al objetivo sobre el plano de enfoque, es decir, lo que se plasma en la película fotográfica o en el chip CCD (esto es, en el elemento sensible de la cámara) es una imagen proyectiva de la escena real formada por el sistema óptico de ésta. Luego esa imagen la vemos ampliada en papel fotográfico o en la pantalla de un ordenador. En cualquier caso, pasamos de una escena tridimensional a una versión en dos dimensiones, por lo que cierta información se pierde: la profundidad.

Podemos ver, de manera simplificada, la formación de una imagen como en la siguiente figura (figura 1.1), una analogía de las primeras “cámaras oscuras” (habitaciones en las que la luz exterior entraba sólo por un pequeño orificio). Los rayos procedentes de los distintos puntos del objeto fotografiado pasan por el centro óptico del objetivo