

3. TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

A. Arozarena Villar

3. Teledetección y Sistemas de Tratamiento Digital de Imágenes

Dentro del Sistema de Producción Cartográfica se estudia la teledetección como sistema de captura directa, en forma digital, de información a distancia.

El **tratamiento digital de imágenes digitales** será la herramienta fundamental de explotación de dicha información, así como de la integración de los procesos de información y comunicación en las fases de captura, tratamiento y explotación.

3.1. Introducción

La teledetección es el sistema integral de captura de información territorial (a partir de la radiación electromagnética captada por el sensor) que se emplea cada día con mayor asiduidad para la captura tanto de información temática (medioambiental), como de información topográfica (MDT, planimetría).

Ello ha sido posible gracias al desarrollo que han experimentado, por un lado, las Técnicas de Tratamiento Digital de Imágenes, lo cual ha facilitado, en todos los procesos, la obtención de datos significativos del territorio y por otro al acceso a la exhaustiva información digital proporcionada por sensores, en su aspecto espacial, radiométrico, espectral y temporal.

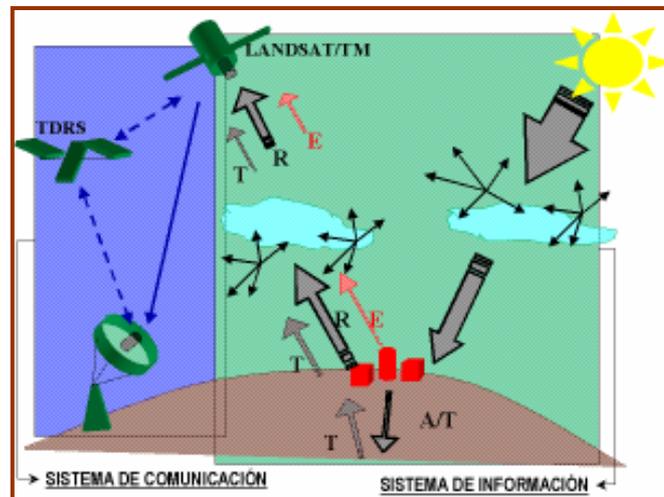


Fig. 1.- Captura mediante teledetección: sistemas de comunicación y de información

Como ya se ha indicado anteriormente, la fotogrametría se puede considerar la tecnología precursora de la teledetección. No obstante, para la captura de información desde satélites nos tenemos que remontar al año 1960 cuando la NASA (National Aeronautics and Space Administration) pone en órbita el primer satélite de la serie TIROS, pionero de los destinados a la observación meteorológica, y en 1972 el ERTS 1 (Landsat 1), comenzando la era de la “Teledetección espacial”. En la actualidad hay cientos de satélites de Observación de la Tierra en órbita, cada uno de los cuales porta uno o varios sensores diseñados para un tipo de aplicaciones específico.

Las imágenes de satélite tienen la ventaja de que abarcan una zona mucho más amplia que las imágenes aéreas, permitiendo realizar estudios territoriales a bajo costo.

En la actualidad los satélites nos proporcionan sistemas integrados de datos territoriales (a partir de la radiación electromagnética transformada en información digital) con gran resolución espacial, radiométrica, espectral y gran periodicidad, que hacen de la teledetección un instrumento indispensable para el conocimiento global de la Tierra, así como para la detección y cuantificación de los cambios que en ella se producen.

El Tratamiento Digital de Imágenes utiliza la información digital (imágenes) procedentes de sensores para la extracción de información específica a los fines requeridos, topográficos y temáticos. Una de sus grandes ventajas es la rapidez de procesamiento de la ingente información digital disponible hoy día para cada proyecto.

Para la obtención de información topográfica y temática se ha venido utilizando, hasta fecha reciente, diferentes sistemas y equipos de producción, con lo que la superposición y correspondencia entre ambas informaciones se hacía difícil, así como un elevado costo en su obtención y actualización.

Para el estudio del Tratamiento Digital de Imágenes se puede dividir, el mismo, en las siguientes fases:

- Concepto de imagen digital.
- Tratamientos previos. Radiométricos y geométricos.
- Mejoras de la imagen.
- Sistemas de Extracción automática de información.

Para finalizar conviene resaltar que las aplicaciones de la teledetección son actualmente muy variadas, prácticamente de aplicación a todas las ciencias y disciplinas del conocimiento de la Tierra, como son: meteorología, ocupación del suelo, geología, edafología, agricultura, estudios forestales, medioambiente, cartografía temática y topográfica, cambio global, análisis geográfico, etcétera.

La teledetección ha propiciado la creación de equipos multidisciplinares que resultan indispensables en la ejecución de cualquier proyecto.

3.2. Tratamiento Digital de Imágenes

El Tratamiento Digital de Imágenes es una parte fundamental de la teledetección, cuyo desarrollo ha impulsado las aplicaciones de los datos digitales procedentes de sensores.

La Imagen en forma digital (matriz numérica bidimensional) obtenida directamente (radiómetros) o por transformación de la imagen analógica (cámaras métricas) en digital mediante escáner, será la fuente indispensable de entrada de datos en el Sistema de Tratamiento.

Asimismo, al ser los datos, en todo el procesamiento, en forma digital posibilita dos aspectos trascendentales en el momento actual, como son:

- La comunicación y transmisión por redes de la información.
- La producción electrónica de documentos cartográficos (mapas, ortofotos, etcétera).

3.2.1. Concepto de Imagen Digital

La **imagen**, de forma genérica, se puede considerar que es un elemento constitutivo indiscutible de todo proceso de transmisión de información (comunicación).

Los primeros elementos que podemos considerar como imágenes (**analógicas**) son los dibujos, gráficos, esquemas, etcétera, los cuales, tanto su confección como su transmisión (reproducción), se realizaban y realizan en ciertos casos, completamente de forma manual.

La complejidad de su ejecución y por tanto de su reproducción variaban sustancialmente, entre otros factores, en función de si la imagen era en blanco y negro o color, dificultando y encareciendo los procesos antes mencionados en función de las características de la imagen. Este escaso conocimiento de las técnicas asequibles en la utilización del color impidió y frenó durante siglos que el mismo se utilizase regularmente en los procesos de producción de documentos.

La **fotografía**, desde sus orígenes, contribuyó de forma definitiva y eficaz a todos los procesos de producción de documentos y especialmente de imágenes.

Las **técnicas analógicas de fotografía, fotomecánica y fotocomposición**, que en algunos casos todavía se siguen utilizando en los procesos productivos, han sido los sistemas inspiradores de los actuales **sistemas digitales** de reproducción y, por supuesto, fotogramétricos.

Una fase fundamental en la producción de imágenes digitales, en aquellos casos que la fuente de información fuese analógica (cámara fotogramétrica), sería la **conversión** de dicha información (señal analógica) en digital mediante convertidores – **ADC**– (cuantificadores y codificadores), como por ejemplo: escáner, digitalizadores, etcétera.

La **cuantificación** tiene por objeto el **muestreo** de la información analógica original y, por tanto, una **discretización** de la misma (función del tiempo o el espacio, en el caso de audio e imagen respectivamente).

La **codificación** (número de bits por muestra) se encargará de hacer reproducible y fácilmente procesable dicha información discretizada, facilitando igualmente su almacenamiento y transmisión.

Todo proceso de cuantificación (convertidores de una señal de entrada en otra de salida según una ecuación dada) lleva consigo una generalización de la información; por ello, pueden considerarse a los cuantificadores como sistemas potentes de compresión.

Las **imágenes digitales**, como ya se ha dicho anteriormente, son una transformación (discretización) de las imágenes originales fotográficas (analógicas) en digitales mediante un escáner (ADC), o bien son en sí mismas digitales si proceden directamente de un barredor multiespectral (caso de la teledetección) o cámara digital.

En cualquier caso, una imagen digital se puede considerar de forma genérica como una matriz (bidimensional) discretizada en niveles de grises –**ND** (valor radiométrico o digital)– con una expresión, por celda (cada celda/elemento de la matriz se denomina **pixel -s-**), del tipo:

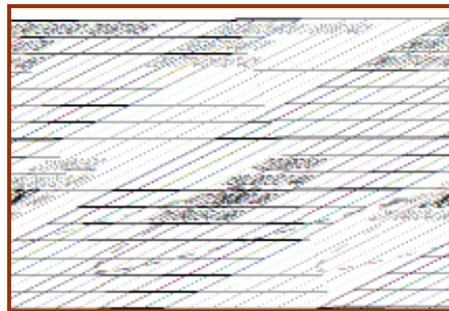


Fig. 2.- Imagen digital (forma decimal).

$$ND = f(x,y)$$

$$f(x, y) \cong \begin{vmatrix} f(0, 0) \dots\dots\dots f(0, M - 1) \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ f(M - 1, 0) \dots\dots\dots f(M - 1, M - 1) \end{vmatrix}$$

Imágenes de M x M píxeles (M filas y M columnas)

Cada pixel representa un valor de la **radiación electromagnética total reflejada – Q –** por cada pixel en un instante dado.

$$ND = f(x, y) = f(\text{energía radiante recibida } -Q-) = i(x, y) \cdot r(x, y)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} i(x, y) &= f(\text{iluminación}) & 0 < i < \infty \\ r(x, y) &= f(\text{reflectancia del objeto}) & 0 < r < 1 \end{aligned}$$

Su tamaño tendrá que ver, asimismo, con la resolución espacial (espaciamiento muestral) de la imagen. En imágenes escaneadas se expresa por **- spi -**, píxeles por pulgada.

3.2.1.1. El hombre como sistema emisor/receptor de señales

El sistema **visual** del ser humano tiene unas características específicas (limitaciones) que conviene recordar en cuanto a su relación directa tanto con los **sistemas digitales** sobre los que interactúa, como con los documentos analógicos de consulta o explotación (texto, gráficos, mapas, etc.) obtenidos a partir de información digital previa.

Consideraremos que respecto a la resolución espacial, la **agudeza visual (av)** del hombre es capaz de separar 5 líneas por mm. Dado que ello conllevaría a separar 5 líneas negras y 5 líneas blancas (con un criterio digital), implica que la **unidad más pequeña** que el ser humano sería capaz de separar sería de 100 μm (asemejable a píxeles de 100 μm).

Con respecto a una adecuada **identificación** de objetos se suele aconsejar que la unidad más pequeña se divida entre 4, obteniéndose la unidad mínima de resolución de 25 μm (UMR) equivalente en muchos casos a la unidad de escaneado.

Podría deducirse, por tanto, que todos los procesos de tratamiento digital de imagen deberían llevarse a cabo entre los 25 μm y 100 μm (correcciones, transformaciones, filtros, remuestreos, etc.).

En cuanto al **color**, nuestra percepción dentro del espectro electromagnético se limita a un intervalo dentro del óptico (0,3 μm – 1 mm de longitudes de onda) del 0,4 - 0,7 μm , correspondiente al visible.

Podemos observar, por proyección (modelo aditivo del color), la descomposición de la luz (radiación electromagnética) en rojo, verde y azul (RVA). Asimismo, por reflexión (modelo sustractivo del color) obtendremos la recomposición de la luz mediante la impresión de tintas amarillo, magenta y cyan (YMC).

No obstante, se puede resumir que nuestras limitaciones en cuanto a color están por debajo de los 7 millones de colores y un máximo de 200 niveles de gris (ND). Recordemos que con 8 bits/píxel en cada uno de los tres colores aditivos (RVA) sería susceptible de representarse 256 ND (niveles de gris) por píxel y 16 millones de colores.

La **capacidad estereoscópica** de observación mediante la visión natural será función de la distancia (Y) del objeto al observador.

3.2.1.2. Códigos, estructuras y formatos

El conjunto de la matriz (filas, columnas), así como cada elemento/celda de la misma (s), podrán estar, en función del dato capturado, **codificados, estructurados y formateados** de diversas formas, tanto para los diversos sistemas de almacenamiento y tratamiento informáticos, como para los diversos sistemas de explotación.

Los datos a **codificar** como píxeles de la imagen se realiza en forma binaria, según un número de bits por píxel (profundidad del píxel/radiometría de la imagen). La **estructura** de los datos vendrá condicionada por su distribución interna (secuencial, jerárquica) y por su orden de grabación, píxeles por cada plano, banda o color.

Así, por ejemplo, para una imagen con 1 bits de profundidad por píxel podemos obtener 2 niveles de grises por píxel ($2^1 = 2$ ND). Este caso se conoce como una imagen **bitmap** en blanco y negro. A medida que aumentamos la profundidad del píxel iremos teniendo una gama de grises más amplia por píxel. Recordando que el hombre es capaz

de observar hasta 200 ND, significaría que para una adecuada representación de una imagen en niveles de grises sería conveniente tener una profundidad de 8bits/s y por banda ($2^8 = 256$ ND).

Para imágenes fotográficas en color se necesitarían 3 planos por imagen y visualizados, por proyección, según la secuencia rojo, verde y azul (RVA) correspondiente. Esto implicaría que si están codificados en 8 bits/s cada plano, obtendríamos hasta 256^3 de colores ($16 \cdot 10^6$ colores).

Son estructuras típicas de grabación y consulta de las imágenes digitales brutas en teledetección:

- BIP (secuencial por pixel).
- BIL (secuencial por líneas).
- BSQ (secuencial por bandas).

Los **formatos** de almacenamiento y presentación de dichas imágenes son de gran importancia tanto por su tratamiento, como para la transmisión de los mismos.

Los formatos se seleccionan con criterios de:

- Calidad.
 - Resolución admitida.
 - Profundidad del pixel.
 - Capacidad de calibración.
 - Capacidad de corrección.
- **Flexibilidad.** Adaptación al cambio de formato entre plataformas de procesamiento
- **Eficiencia.** Al cálculo, almacenamiento y transmisión.

Los formatos de imagen más extendidos son: TIFF, PCX, GIF, EPS, PSD, BMP, IMG, JPEG, MPEG, ECW, MrSID, etcétera.

3.2.1.3. Compresión de imágenes

El objetivo de la compresión de imágenes es la reducción del número de bits con vistas a transmitir o almacenar dicha imagen en condiciones óptimas para el fin requerido.

Los métodos de compresión se clasifican, de forma resumida, en:

Compresión sin pérdidas

Se utilizan normalmente en compresión de texto. Emplean normalmente estadísticas de los valores que se repiten.

Son sistemas que nos permiten volver a la imagen original sin pérdidas. Bien es verdad que en algunos casos la compresión es mínima.

Los sistemas más significativos de compresión serían: Las técnicas de “**codificación entrópica**”, utilizadas en fax y gráficos, son función de la frecuencia de aparición de cada símbolo dedicando menos bits a los símbolos con mayor frecuencia (Teoría de Shannon) ; **RLE** (bitmap) ; **Huffman** (texto).

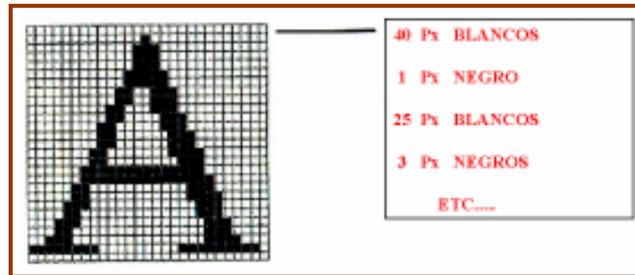


Fig. 3.- Compresión de imágenes. Compresión “RLE”.

La tasa de compresión es del orden máximo 1:5.

Compresión con pérdidas

Son métodos no reversibles aunque, como contrapartida, admiten ratios de compresión altos. Se pretende, asimismo, que la pérdida que se produce sea lo más objetiva posible, teniendo que existir un compromiso a priori con la calidad de la imagen descomprimida.

Son los métodos que se emplean para imagen y audio.

Los sistemas actuales más empleados son:

- JPEG (imágenes estáticas, compresión 1:15).
- ECW (puede llegar con gran calidad 1:50).
- MrSID (puede llegar con gran calidad 1:50).
- MPEG (imágenes dinámicas sincronizan audio y video).

Estos sistemas utilizan técnicas estadísticas junto con transformaciones de la imagen en términos de variación de brillo.

La imagen digital la consideramos, por tanto, como una matriz numérica bidimensional (discretizada en niveles de grises -ND- por pixeles).

En una imagen digital se hace necesario conocer y/o definir tanto su **codificación** (niveles de grises \leftrightarrow radiometría de la imagen), **estructura** y **formato**, como su **resolución**, función de la fracción de muestreo (por ejemplo, pixeles por pulgada -**spi**-). Este último punto estará relacionado con la escala gráfica (concepto importante, especialmente en los documentos cartográficos) y con el tamaño de observación y/o reproducción de forma general.

3.2.2. Tratamientos previos

Una vez definida la imagen digital como una matriz numérica bidimensional (valores discretos -ND-), los tratamientos digitales serán operaciones matemáticas sobre dichos valores (operadores matemáticos básicos, cálculo matricial, etc.).

Se han clasificado y reunido los diversos tratamientos de acuerdo a las operaciones que “normalmente” se realizan sobre las imágenes digitales.

En este epígrafe se enunciarán las correcciones geométricas básicas más importantes usadas en el tratamiento de imágenes, con un apartado especial dedicado a la corrección de imágenes espaciales captadas por sensores remotos aerotransportados y a las correcciones radiométricas necesarias como consecuencia de los errores producidos en el proceso de captura de la información digital.

3.2.2.1. Correcciones radiométricas

Las correcciones radiométricas son aquellas que afectarán directamente a la radiometría de la imagen. Dichas correcciones se hacen necesarias debido a los valores (ND) erróneos registrados en la **fase de captura y/o transmisión** de la información (caso de ser imágenes digitales procedentes de satélites artificiales).

En imágenes obtenidas por medios aerotransportados (satélite o avión) dichos errores en la captación de los valores ND, pueden ser debidos a perturbaciones atmosféricas que los modifican (fenómenos de absorción y dispersión atmosférica) o a deficiencias en la construcción del sensor.

La corrección atmosférica se efectuará según modelos matemáticos que ligarán el valor registrado de ND con los valores reales existentes del objeto sobre el terreno (proceso de calibración).

Los errores producidos por el sensor se solventarán conociendo los datos de calibración radiométrica del mismo.

3.2.2.2. Correcciones geométricas

Las correcciones geométricas son necesarias realizarlas básicamente debido a dos motivos:

- A las variaciones espaciales ocurridas en el proceso de captura de la información e inherentes al movimiento del sensor (aleteo, cabeceo, variaciones en altura y velocidad, etc).
- Por necesidad de ajustar, dicha información, a un sistema de referencia determinado (sistema geodésico, proyección cartográfica, etc).

Previamente a la propia corrección geométrica se repasan conceptos geométricos de las variaciones espaciales.

Dentro de las **transformaciones básicas principales**, una de las más importantes serán las correcciones geométricas (**variaciones espaciales**). Son correcciones de este tipo: la rotación, el cambio de escala y la traslación de los

diferentes pixeles de la imagen en 3 dimensiones (el caso de 2 dimensiones, sería una particularización del caso anterior).

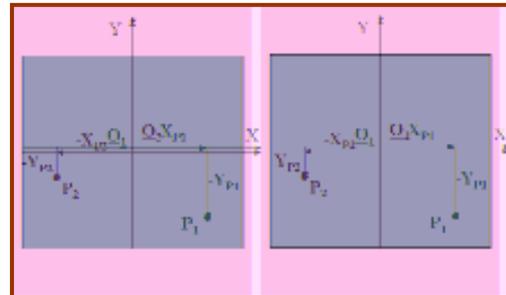
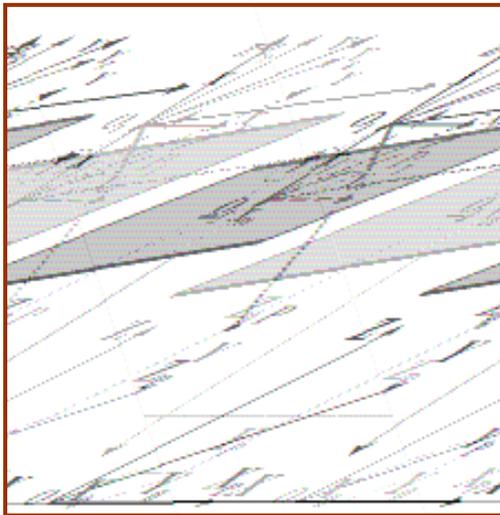


Fig. 4.- Coordenadas imagen.

Fig. 5.- Triedro espacial de orientación.

Las principales variaciones espaciales son:

- **Rotación.** La rotación de un punto (X_{P1}, Y_{P1}, Z_{P1}) a otro (X_G, Y_G, Z_G) , de manera arbitraria en el espacio, requiere de tres transformaciones o giros $(\omega, \varphi, \kappa)$, según los tres ejes (X, Y, Z) de coordenadas espaciales de referencia, respectivamente.
- **Traslación.** Sería el caso de trasladar un punto con coordenadas (X_G, Y_G, Z_G) a una nueva situación mediante un desplazamiento (X_0, Y_0, Z_0) .
- **Cambio de Escala.** Se trata de unas determinadas variaciones (escalares - λ -) a lo largo de los ejes X, Y, Z .

Los pixeles afectados por el conjunto de estas variaciones espaciales se enunciarán de la forma siguiente:

Siendo:

$(X_{P1}, Y_{P1}, Z_{P1}) \rightarrow$ Coordenadas imagen del píxel.

$(X_G, Y_G, Z_G) \rightarrow$ Coordenadas del píxel afectadas de los 3 giros.

$(X_0, Y_0, Z_0) \rightarrow$ Traslación espacial.

$(X_P, Y_P, Z_P) \rightarrow$ Coordenadas finales del píxel.

$$\begin{bmatrix} X_\omega \\ Y_\omega \\ Z_\omega \end{bmatrix} = R_x \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ Z_{P1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \text{sen } \omega \\ 0 & -\text{sen } \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ Z_{P1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_{\omega\varphi} \\ Y_{\omega\varphi} \\ Z_{\omega\varphi} \end{bmatrix} = R_y \begin{bmatrix} X_\omega \\ Y_\omega \\ Z_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\text{sen } \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\omega \\ Y_\omega \\ Z_\omega \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_{\omega\varphi\kappa} \\ Y_{\omega\varphi\kappa} \\ Z_{\omega\varphi\kappa} \end{bmatrix} = R_z \begin{bmatrix} X_{\omega\varphi} \\ Y_{\omega\varphi} \\ Z_{\omega\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \text{sen } \kappa & 0 \\ -\text{sen } \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\omega\varphi} \\ Y_{\omega\varphi} \\ Z_{\omega\varphi} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_{\omega\varphi\kappa} \\ Y_{\omega\varphi\kappa} \\ Z_{\omega\varphi\kappa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = R_z R_y R_x \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ Z_{P1} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ Z_{P1} \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix}$$

Siendo:

$$R_z R_y R_x = R \quad M. \text{ortog.} \Rightarrow R^{-1} = R^T = M$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ Z_{P1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} X_P &= \lambda \cdot R \cdot X_{P1} + X_O \\ Y_P &= \lambda \cdot R \cdot Y_{P1} + Y_O \end{aligned}$$

Obteniéndose las coordenadas finales, por pixel, de la imagen en función de las coordenadas imagen el mismo.

Las **correcciones geométricas** tienen como objetivo modificar la geometría de los pixeles, ajustándolos normalmente a un sistema geométrico dado (de un sistema

imagen1 a otro sistema imagen2, sistema de proyección cartográfica determinado, etc), manteniendo de forma más significativa la radiometría de la imagen original.

Así, por ejemplo, en el proceso de corrección geométrica de las imágenes espaciales conviene recordar previamente que una imagen captada por un sensor/satélite, tiene los siguientes componentes:

- **Espacial.** La posición específica de cada pixel en la imagen a una resolución y un sistema de captura dados.
- **Radiométrica.** Según su codificación y estructura nos definirán un rango de niveles de grises por píxel. Por ejemplo, con 8 bits/píxel tendríamos $2^8 = 256$ Niveles de Grises.
- **Espectral.** La energía total – Q – se dividirá en el momento de la captura por el sensor, en zonas del espectro electromagnético, registrándose cada zona en una banda – Q_i -.
- **Temporal.** La información de cada píxel por banda – Q_i – y codificada en valor de **ND** , corresponde a un instante dado.

En aplicaciones cartográficas, como asimismo en otro tipo de imágenes que necesiten ajustarse a un sistema de referencia, la realización de correcciones geométricas conlleva el estudio de las siguientes fases:

- **Estudio del modelo de deformación** de la imagen según ecuaciones matemáticas que relacionan las coordenadas de la imagen digital (fila y columna) con las coordenadas de referencia cartográficas (X, Y , en el caso de coordenadas planas o longitud (λ) y latitud (ϕ), en un sistema de coordenadas geográficas). Es posible, asimismo, introducir en dichas correcciones el efecto de la altitud del punto de acuerdo a modelos que contemplen este parámetro. Para ello, se hace necesario el disponer previamente de Modelos Digitales de Elevación (MDT) del territorio.
- **Corrección geométrica**, donde se llevará a cabo la propia transformación geométrica de todos los píxeles y la creación de la nueva imagen digital por asignación del nuevo valor radiométrico correspondiente.

En el proceso de corrección geométrica hay que distinguir, previamente, entre imágenes **instantáneas**, captadas de forma que la información correspondiente a la reflectancia para cada pixel (ND) se obtiene a la misma vez en toda la superficie de la imagen, como es el caso de las fotografías en general y de las fotografías aéreas (fotogrametría) en particular, y aquellas imágenes **secuenciales**, donde cada pixel es capturado en distinta fracción de tiempo y en una secuencia de grabación que depende del tipo de sensor y del barrido que efectúe sobre el terreno (barredores multispectrales).

Una vez definidos los criterios básicos que se inscriben en el proceso de corrección geométrica, la realización se efectuaría de la forma siguiente:

Cálculo del modelo de deformación

Los sistemas más empleados se pueden dividir en tres grupos:

- **Ajustes por métodos polinomiales.** El método consiste en el cálculo de los coeficientes de un polinomio (normalmente de segundo grado), mediante el conocimiento de coordenadas del terreno (x, y) de puntos de control, en un Sistema Geodésico y proyección cartográfica dada y de sus coordenadas homólogas en la imagen definidos por la fila y columna (u, v).

Las ecuaciones serían:

$$\begin{aligned}u &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\v &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2\end{aligned}$$

El cálculo, al haber más ecuaciones que incógnitas, se resuelve por mínimos cuadrados.

- **Modelización Paramétrica.** En imágenes capturadas de forma instantánea (fotografías aéreas), la fotogrametría ya ha resuelto dicho problema mediante el conocimiento de la posición del centro de proyección del sensor (coordenadas X,Y,Z) y de la actitud del mismo (tres giros en el espacio: ω , ϕ , κ). Por tanto, el problema consiste en resolver, con las ecuaciones anteriormente descritas (epígrafe 3.2.2.2) y las ecuaciones fundamentales de la fotogrametría, el cálculo de dichas 6 incógnitas por cada toma (12 incógnitas, 6 por fotograma, para el caso de un modelo estereoscópico espacial).

Para imágenes procedentes de barredores multiespectrales, se necesita el estudio del modelo físico de deformación pixel a pixel originado en el proceso de captura. Para efectuar una adecuada modelización se necesita conocer además el Modelo Digital de Elevación.

En este caso, el modelo matemático es más complejo (conocimiento de la posición, actitud y sistema de barrido del sensor), pero su ejecución posterior es mucho más simple, al necesitar un menor número de puntos de apoyo terrestre por escena.

- **Cálculo dinámico.** Se realiza de forma instantánea y sincronizada con la captura, la **posición** -mediante la incorporación de Sistemas de Posicionamiento Global (SPG)- y **actitud** -sistemas inerciales de navegación- del sensor, incorporados conjuntamente en los propios sistemas de captura (plataforma/sensor).

Corrección geométrica

Se realiza en dos pasos:

- Transformación de todos los pixeles de la imagen según los modelos de deformación elegidos (cálculo de coordenadas de la nueva imagen transformada).

- Asignación de la adecuada radiometría a cada pixel corregido anteriormente. Esto implica una nueva posición de los mismos y, por lo tanto, una necesaria asignación del valor radiométrico más próximo al que tenía previamente (interpolación del valor radiométrico = ND).

Los métodos más empleados de interpolación son:

- **Vecino más próximo.** Según el valor más próximo del pixel que tenía antes. Es el método más sencillo, pero el menos eficaz visualmente.

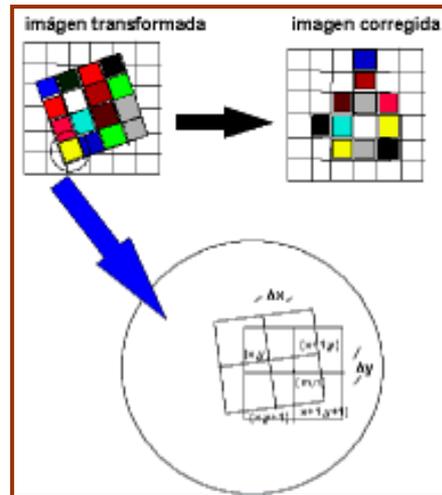


Fig.6.- Asignación radiométrica por el vecino más próximo

- **Bilineal.** Interpolación lineal de valores entre el entorno de pixels más próximos. Puede introducir alteraciones geométricas en la imagen.
- **Bicúbica.** Ajuste mediante polinomios, considerando el contorno de pixels próximos. Normalmente se utilizan 16 polinomios en un entorno de 4 x 4 pixels. Su valor radiométrico se altera sustancialmente, pero es el que mejores resultados ópticos (para la interpretación) nos ofrece.



Fig. 7.- Ortofoto digital 1/ 10 000 (1 m resolución).
IGN- CNIG

3.2.3. Realces y mejoras de imagen

Los "niveles ND" de cada pixel pueden ser modificados con vistas a **mejorar o resaltar** cierta información para un estudio determinado, siendo precisamente esta modificación el concepto de "**realce de imágenes digitales**".

Se pueden definir, a priori, diversos tipos de realces que normalmente nos mejorarán la visualización, eliminarán ruidos, resaltarán ciertas características geométricas, etc. con vistas a obtener unos resultados determinados.

Conviene destacar, asimismo, que la forma más elemental de conocer una imagen digital es a través de su **histograma de frecuencias** para cada ND –valor digital-, donde quedará patente tanto el **contraste** (rango entre máximo y mínimo del valor digital para cada pixel), como el **nivel de radiación**. Ambos conceptos permitirán diseñar un tipo específico de realces.

Los tipos de realces se pueden efectuar a través de software o de hardware, siendo determinante la elección de un sistema u otro, influyendo, su elección, tanto en el costo como en la velocidad de ejecución de dicho tratamiento digital.

De manera resumida y basándonos en la forma del tratamiento efectuado (función del número de pixeles afectados), tendremos:

- **Realces radiométricos.** Se conocen también como **transformación de histogramas**. Se realizan específicamente sobre 1 pixel, sin tener en cuenta los de su alrededor. Por lo general, implican un mayor contraste.
- **Realces geométricos.** Se les suelen llamar simplemente **filtros**, donde la modificación del nivel de gris de un pixel determinado conlleva el estudio o incidencia de los de su entorno.
A su vez, se pueden dividir en:

- Realces geométricos en el **dominio espacial**.
Para unos valores (x, y) de la imagen, se pueden ordenar secuencialmente dichos pixeles desde un origen seleccionado (esquina superior izquierda, por ejemplo), llamándose distancia del píxel al origen la distancia euclídea correspondiente. La función $f(x, y)$ nos representará la **intensidad o valor del nivel de gris (ND)**.
- Realces geométricos en el **dominio de frecuencias**.
Para unos valores (u, v) de "frecuencias", la función $F(u, v)$ nos representarán **amplitudes**.

3.2.3.1. Realces radiométricos

La modificación pixel a pixel, significará que para un valor $f(x_i, y_j)$ de entrada le corresponderá un $f'(x_i, y_j)$ de salida, es decir, a un nivel de gris **ND** de entrada le corresponderá un nivel de gris **ND'** de salida.

$$ND = f(x_i, y_j) \rightarrow f'(x_i, y_j) = ND'$$

Estos realces son de fácil implementación por software, confeccionándose **tablas de consulta** (LUT) donde se realizan en tiempo real dichas transformaciones. Los realces radiométricos más empleados son:

■ **Modificación de contraste (remuestreo de píxeles)**

- **Modificación lineal:**
 Por expansión lineal del histograma.
 Mejoran normalmente la calidad visual de la imagen.
 Su expresión matemática sería:

$$ND' = f(ND, M, m)$$

M = rango máximo de nivel de gris
 m = rango mínimo de nivel de gris

Para valores: $ND < m \rightarrow ND' = 0$

Para valores entre: $m < ND < M \rightarrow \frac{ND - m}{M - m} = \frac{ND' - 0}{255 - 0}$

Para valores: $ND > M \rightarrow ND' = 255$

- Otras modificaciones serían:
 En forma logarítmica, estadística, líneas con puntos de cambio de pendiente, etcétera.

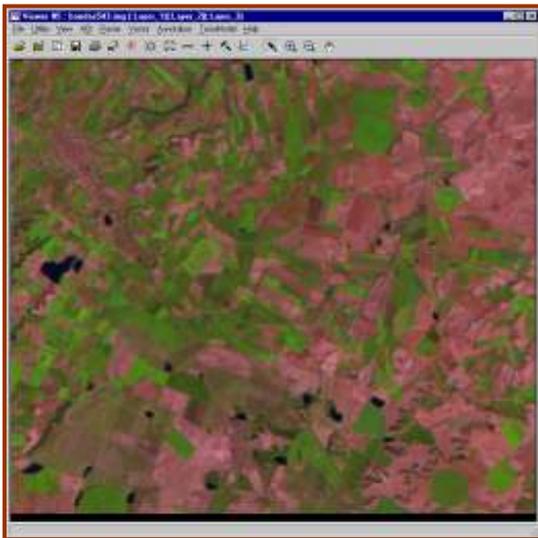


Fig. 8.- Visualización de la combinación de bandas 5 4 3 /RGB (Landsat TM).

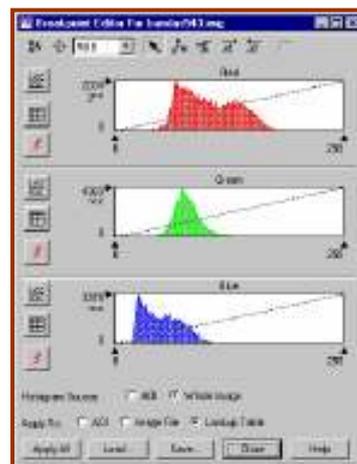


Fig. 9.- Histograma de frecuencias de las bandas 5 4 3.

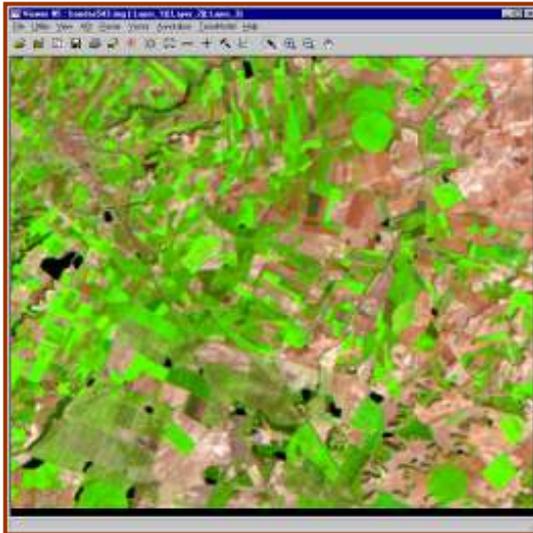


Fig. 10.- Modificación de contraste aplicado a las bandas 5 4 3.

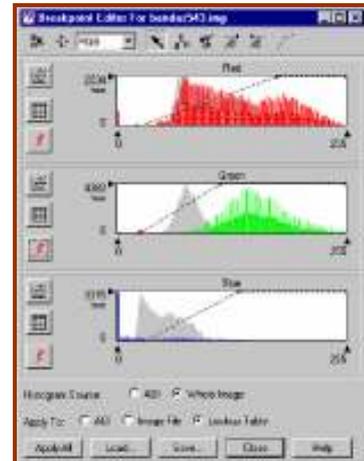


Fig. 11.- Histograma resultante (bandas 5 4 3 modificadas).

■ Ecuación del histograma

Como en todo proceso de ecualización, se pretende:

- Expandir el histograma al rango máximo posible de ND.
 - Incrementar las frecuencias para cada ND.
- Con ello conseguiremos, por tanto, una mejor "calidad visual".

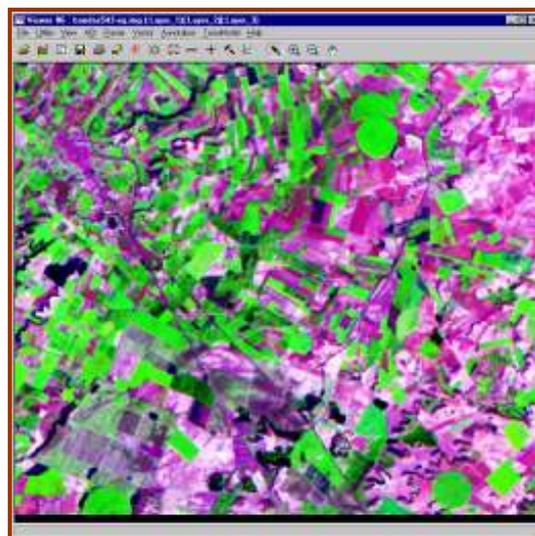


Fig. 12.- Ecuación del histograma (bandas 5 4 3)
Lansat TM.

■ Particiones de densidad (escalera)

Esta transformación se realiza dando determinados cortes por escalones (agrupando los valores de píxeles en determinados niveles de grises –ND–). Con ello se consigue un agrupamiento de píxeles según rangos radiométricos que pueden facilitar el análisis de imágenes.

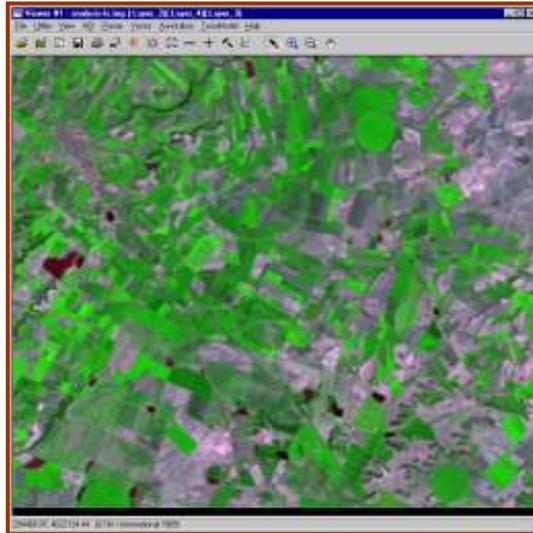


Fig. 13.- Análisis mediante particiones de densidad (Landsat TM).

3.2.3.2. Realces geométricos

Como ya se ha dicho anteriormente, el nuevo valor del píxel realizado **-ND'** siempre será función de los de su entorno.

Estos realces se suelen emplear principalmente para suavizar o eliminar ruidos en la imagen y para la detección de bordes.

Como dicha transformación modifica todos los valores de los niveles de grises de la imagen no se deberían emplear antes de una fase de extracción de información (por ejemplo, en una clasificación asistida por ordenador).

Sabiendo que una imagen queda representada por $f(x,y) = ND$ con una variación espacial, se puede hacer corresponder dicha función a una "señal sinusoidal" con una frecuencia determinada (y, por tanto, con un período T).

- Si **$f(x, y)$ es periódica**, será una función infinita de senos y cosenos con diferentes Amplitudes y Fases.
Las funciones $f(x,y) = f^\infty$ (sen, cos), se conocen como "**Series de Fourier**"
- Si **$f(x, y)$ no es periódica**, pero de variable real e integrable (pudiendo ser, a su vez, continua o discreta), se puede aplicar toda la teoría de "**Transformadas de Fourier**", cuya utilidad se verá a continuación.

3.2.3.2.1. Realces geométricos en el dominio espacial

Estos tipos de realces (filtros) se caracterizan por el gran volumen de cálculo a desarrollar.

En el caso de una función discreta $g(x, y)$, se define como "filtro lineal" (**convolución**):

$$g'_{ij}(x, y) = \sum_{-h}^h \sum_{-h}^h g_{(i+k, j+l)}(x, y) w_{kl}$$

Siendo:

i, j = imagen de i filas por j columnas

k, l = intervalo del filtro

$h, -h$ = ventana de actuación

$w_{k,l}$ = coef. de peso

En definitiva, se trata de multiplicar dos matrices (una ventana –matriz1- que va recorriendo toda la imagen digital –matriz2-).

Los tipos más empleados de filtros son:

■ Filtro de paso bajo

- Se emplean para eliminar "ruidos".
- "Suavizan" la imagen (disminuye el contraste).
- Este tratamiento implica una pérdida de información de alta frecuencia.
- Un filtro muy empleado es el **filtro de media** (media aritmética), siendo la matriz filtro del tipo:

$$g(x, y) = \frac{1}{9} * \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

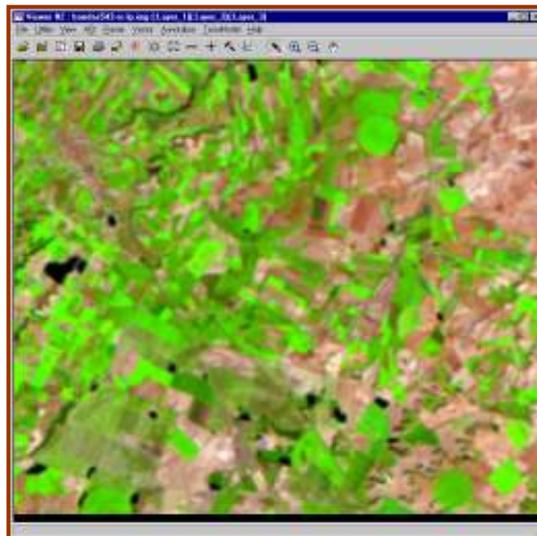


Fig. 14.- Realce geométrico. Filtro de paso bajo. Landsat TM.

■ **Filtro de mediana**

- Se suelen emplear para eliminar ruido aleatorio.
- El diseño de este "filtro" consiste en escoger **el píxel central** de los valores de la ventana (mediana).
- En este proceso se puede perder bastante información.
- Un filtro que emplea este criterio es el filtro de Tukey.
- Suele ser poco sensible a los valores extremos.

■ **Filtro de la moda**

- Suavizan los resultados de una clasificación o agrupamiento de píxeles.
- El operador consiste en escoger el valor **más frecuente** de la ventana (matriz filtro).

■ **Filtro de paso alto**

- Es el más empleado para detectar bordes.
- Es un filtro direccionable.
- Ejemplo de este tipo, según la dirección del borde a detectar sería:

HORIZONTAL	VERTICAL	DIAGONAL	
$\frac{1}{9} * \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\frac{1}{9} * \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$	$\frac{1}{9} * \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{vmatrix}$	$\frac{1}{9} * \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{vmatrix}$

A este tipo, corresponden los filtros de Roberts, Sobel, Prewitt, etcétera.

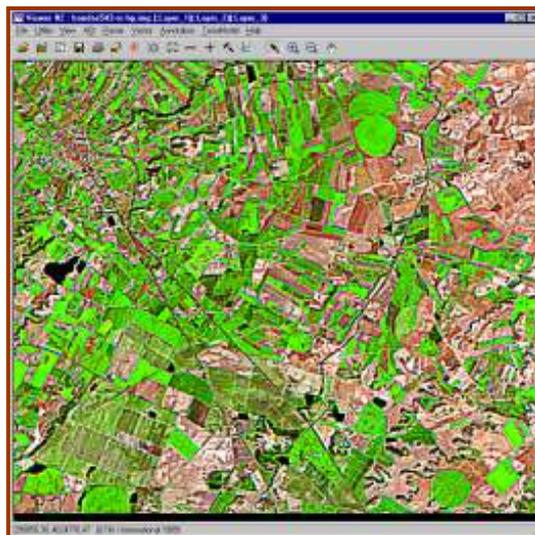


Fig. 15.- Realce geométrico. Filtro de paso alto. Landast TM.

■ **Laplacianos**

- Son filtros de detección de bordes en todas direcciones.
- Son complejos y de difícil implementación en un sistema. (Se resuelven mas fácilmente mediante la Transformada de Fourier).
- Como la función es discreta (en niveles de grises) el filtro Laplaciano sería del tipo:

$$g'_{ij} = g_{i-1,j} + g_{i+1,j} + g_{i,j-1} + g_{i,j+1} - n \cdot g_{ij}$$

Un ejemplo de filtro laplaciano sería:

$$\begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

ventana $i, j = 3 \times 3$

núcleo = 4

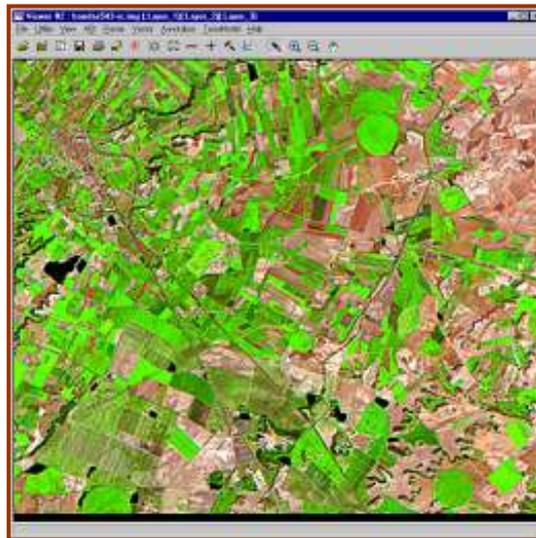


Fig. 16.- Realce geométrico laplaciano. Landsat TM.
Ventana 3x3. Coeficiente de peso 4.

3.2.3.2.2. Realces geométricos en el dominio de frecuencias

Para operar en el dominio de frecuencias primero conviene revisar como pasamos del "dominio espacial" (dominio de la imagen digital) al de "frecuencias" y después se analizarán las consecuencias de trabajar en este dominio.

Para una mejor comprensión, se explica para el caso de una función continua de 2 variables:

■ **Dominio espacial**

Sabemos que para cada píxel $(x, y) \rightarrow \exists f(x, y) = ND$

Siendo, $ND =$ valor de gris.

Esta función varia a medida que nos separamos del origen.

Esta variación espacial quedará caracterizada por su:

$$\text{Período : } T = \frac{1}{f} \quad ; f = \text{frecuencia}$$

$$\text{Amplitud : } A$$

■ Dominio de frecuencias

La función $f(x, y)$ tendría una representación en el dominio de frecuencias representado según:

$$(u, v) = \text{frecuencias} \rightarrow \exists F(u, v) = A \text{ ,siendo } A \text{ la amplitud}$$

Para pasar del "dominio espacial" al de "frecuencias" utilizaremos la **transformada de Fourier (FT)** y al contrario por la **transformada inversa de Fourier (FT⁻¹)**.

El motivo de trabajar en el dominio de frecuencias es debido, fundamentalmente, a las propiedades de dicha transformada y, en especial, a la transformada inversa de Fourier, puesto que ambas facilitarán sustancialmente los procesos de "convolución" y cálculo de "laplacianos".

3.2.3.2.3. Transformada de Fourier

Para el caso de una función discreta $f(x, y)$ de dos variables y pixeles cuadrados ($N \times N$) de una imagen, la transformada de Fourier (FT) será:

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi \frac{ux+vy}{N}}$$

Variando $u, v = 0, 1, \dots, (N - 1)$

y la transformada inversa F^{-1} , (FT⁻¹):

$$F^{-1}(F(u, v)) = f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi \frac{ux+vy}{N}}$$

Variando $x, y = 0, 1, \dots, (N - 1)$

Con lo que volvemos, por dicha F^{-1} a la función origen $f(x, y)$, imagen original. La forma de operar que seguiremos en todos los procesos será siempre de la forma siguiente:

1°. Pasaremos las funciones (imagen y filtro) al dominio de frecuencias por la transformada de Fourier (FT).

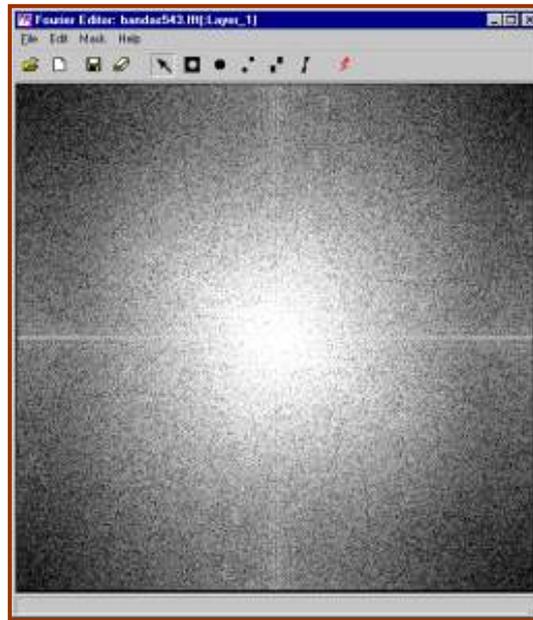


Fig. 17.- Visualización de la Transformada de Fourier (FT). Imagen Landsat TM.

2°. Operaremos entre dichas transformadas según las **propiedades** de la FT.

3°. Volveremos al dominio espacial por la transformada inversa (FT^{-1}), obteniéndose los procesos de convolución y laplacianos del dominio espacial anteriormente explicado.

Dentro de las propiedades de la transformada de Fourier (FT): separabilidad, traslación, periodicidad, simetría conjugada, rotación, distributibilidad, escalado, resaltaremos aquellas cuya aplicación tienen una influencia directa en el filtrado de imágenes, concretamente en los procesos de "**convolución** y **laplacianos**" estudiados en el dominio espacial, facilitando en gran medida su obtención.

Convolución

Sabemos que una convolución en el "dominio espacial" equivale a la multiplicación de matrices (imagen original y el propio filtro).

Utilizando los conceptos anteriores mediante la FT obtendremos las correspondientes transformadas a la imagen y al filtro.

Imagen $f(x,y) \rightarrow F(u,v)$ su correspondiente FT

Filtro $g(u,v) \rightarrow G(u,v)$ su correspondiente FT

Cumpléndose por las propiedades de la Transformada de Fourier

$$f(x, y) \otimes g(u, v) = F(u, v) \cdot G(u, v)$$

Siendo bastante más sencillo obtener dicha convolución por la simple multiplicación de dos transformadas de Fourier y su posterior conversión al dominio espacial por la transformada inversa.

Laplacianos

Se utilizan para resaltar bordes en todas direcciones.
Según las propiedades de la FT para el Laplaciano:

$$F(g'_{ij}) = (-2\pi)^2 (u^2 + v^2) F(u, v)$$

Se calcula la transformada simplemente obteniendo la de la imagen $F(u, v)$ y operando según la ecuación anterior.

Por la transformada inversa (FT^{-1}), se obtiene directamente el Laplaciano:

$$F^{-1}(F(g'_{ij})) = g'_{ij}$$

Luego, la forma de operar más sencilla, sería:

- 1º Obtener la (FT) del Laplaciano $F(g'_{ij})$
- 2º Calculamos su inversa (FT^{-1}) $F^{-1}(F(g'_{ij}))$
- Obteniéndose directamente el Laplaciano (g'_{ij})

3.2.4. Sistemas de extracción de información asistidos por ordenador

Como ya se ha dicho anteriormente, una imagen digital captada por un sensor aerotransportado nos puede proporcionar información de cuatro componentes: **espacial** (resolución), **espectral** (imágenes multispectral/ número de bandas), **radiométrica** (niveles de gris = número de bits/s = profundidad del pixel) y **temporal** (para una fecha dada).

En cualquier otro tipo de imagen digital habrá que conocer a priori que tipo de información lleva incorporada en cada pixel y su composición.

La combinación y análisis de dichas componentes nos indicarán y facilitarán la explotación de dichos datos digitales.

Los sistemas más empleados de extracción de información, agrupados según el tipo de tratamiento matemático, serían los que se explican en los epígrafes siguientes.

3.2.4.1. Operaciones aritméticas

Son operaciones sencillas que se suelen emplear en imágenes multispectrales o multitemporales (de la misma zona y coincidentes en su geometría).

Los operadores matemáticos más utilizados son la **suma**, la **resta**, la **multiplicación** y la **división** de los valores radiométricos (ND) por píxel, existentes en cada banda.

En términos generales, se puede decir que se emplean para: eliminar ruidos (valores anormales de ND en la fase de captura de información), detección de cambios, enmascaramiento o reducción de ciertos efectos atmosféricos o topográficos.

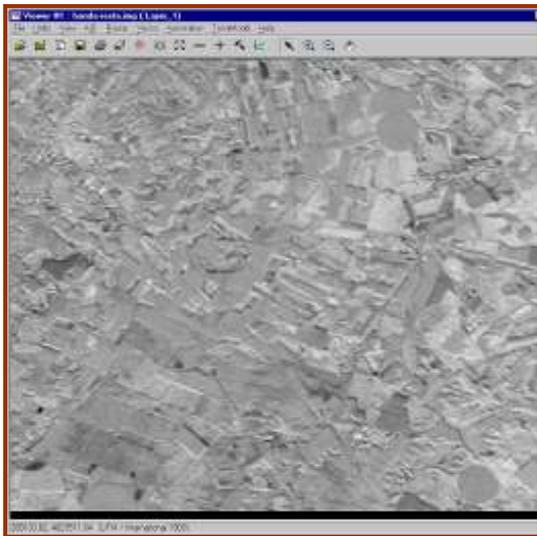


Fig. 18.- Operador matemático resta de bandas (7-3).
Landsat TM.

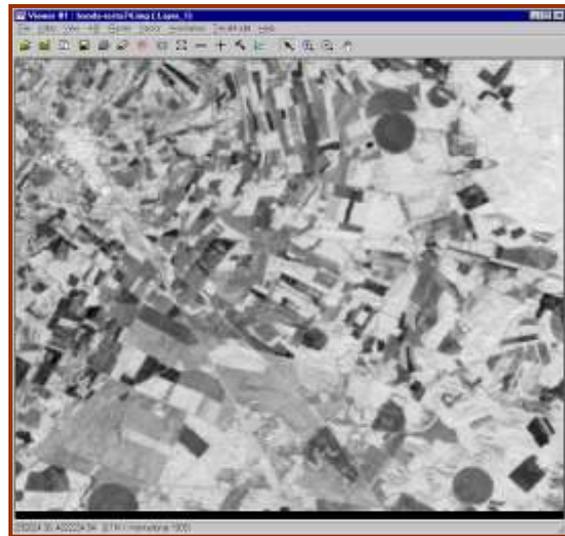


Fig. 19.- Operador matemático resta de bandas (7-4).
Landsat TM.

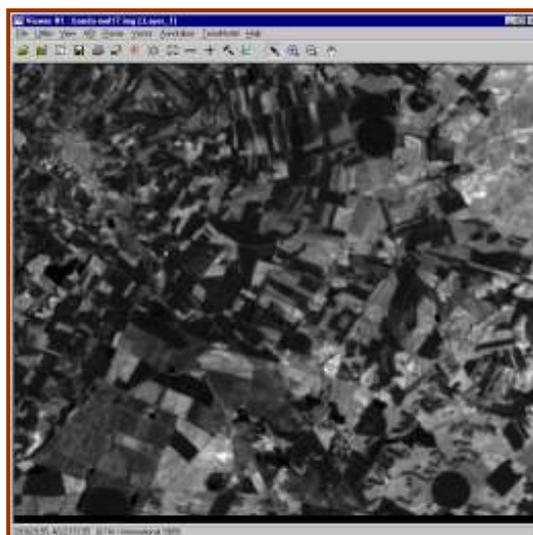


Fig. 20.- Operador matemático multiplicación de bandas
(7*1). Landsat TM.

3.2.4.2. Análisis de componentes principales

El objetivo fundamental, en imágenes multiespectrales, es la eliminación de información redundante (solapamiento) que pueda existir entre las diversas bandas espectrales de la misma imagen.

El producto obtenido son unas nuevas **bandas sintéticas**, donde se ha suprimido dicha información y, por lo tanto, ocupan menos espacio digital.

Esto se consigue mediante la obtención de bandas sin correlación entre ellas (coeficiente de correlación, $r = 0$) y con máxima varianza.

Las fases a seguir serían:

- Definición de la nueva dimensionalidad de los datos (número de bandas sintéticas).
- Identificación y obtención de los nuevos ejes de variación de los datos.

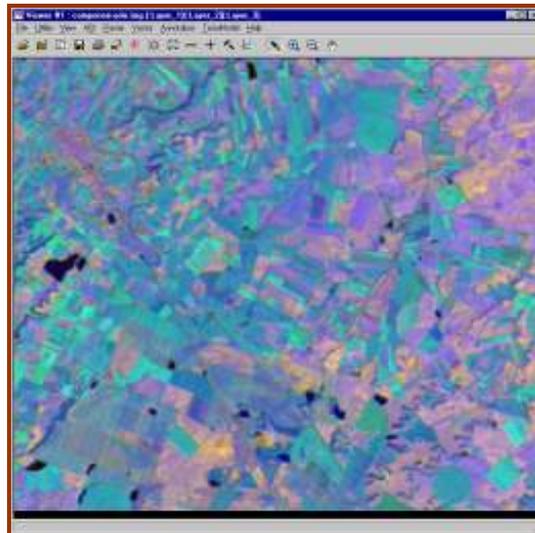


Fig. 21.- Imagen resultante (3 bandas) del análisis de componentes principales (6 bandas Landsat TM).

3.2.4.3. Sistemas automáticos de clasificación

Los diversos valores radiométricos de cada pixel (ND) por banda (valor espectral), contiene información que identifica en gran medida al objeto que se encuentra en la imagen multiespectral.

Para ello, conviene recordar el concepto de **signatura espectral** de un objeto o clase (X), que es el rango (ΔND_i) de valores radiométricos correspondientes para cada banda que identifican el mismo:

$$\bar{X} = (\Delta ND_1, \Delta ND_2, \Delta ND_3, \dots)$$

Los sistemas de clasificación intentarán asignar cada pixel a una de esas clases mediante el etiquetado de los mismos para, posteriormente, a través de su unión, y según algoritmos dados, formar las clases correspondientes.

Los métodos básicos más empleados se explican a continuación

3.2.4.3.1. Clasificación no supervisada

El método consiste en agrupar pixeles con similitud radiométrica por cada banda espectral según estructuras matemáticas.

No se conoce a priori la significación real sobre el terreno de dichas agrupaciones. Posteriormente, habrá que interpretar y modificar dichas clases a clases reales con ayuda de información existente (mapas, fotos aéreas, etcétera).

Una de las técnicas más empleadas es el método **ISODATA** (proceso iterativo de clasificación), cuyas fases más destacables son:

- Definición de clases espectrales a separar.
- Estimador matemático discriminante. Normalmente se emplea la distancia euclídea – **d** – entre pixeles (i, j), (k, l):

$$d = \sqrt{(\Delta x_{i,k}^2 + \Delta x_{j,l}^2)}$$

- Definición del centro de cada clase en el espacio espectral.
- Asignación de cada pixel al centro más próximo según el estimador matemático definido. Este nos dará una primera clasificación (cluster).
- A partir de la clasificación anterior se obtienen nuevos centros de clase. Si coinciden con los anteriores, el proceso se termina. Si no coinciden, se hace una nueva iteración.

El proceso puede finalizar si se ha definido un número máximo de iteraciones o los residuos obtenidos para cada clase (una vez agrupados todos los pixeles en un rango máximo determinado) son menores que una cantidad prefijada.

Como es lógico, en este proceso las clases (número de pixeles agrupados y, por tanto, con una significación superficial sobre el terreno) van variando con cada iteración.

Este método, suele ser previo al de la **clasificación supervisada**, dado que nos proporciona un agrupamiento de pixeles objetivo del territorio (imagen) lo que facilitará su identificación más precisa en el siguiente proceso de clasificación.

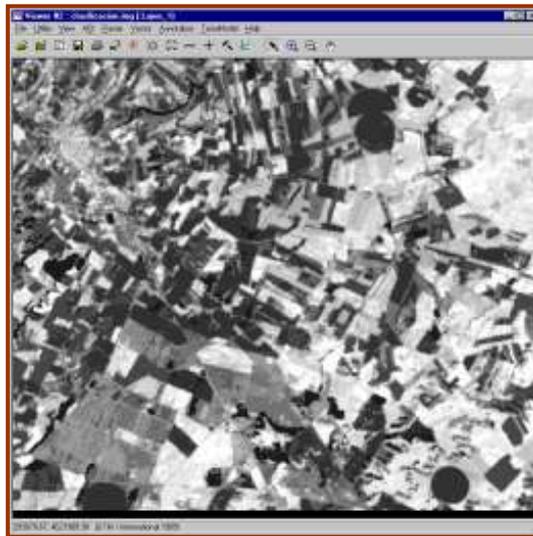


Fig. 22.- Clasificación no supervisada Imagen Landsat TM (6 bandas). Resultado de la clasificación.

3.2.4.3.2. Clasificación supervisada

En este método se definen a priori las clases de información que existen en la imagen (no donde se encuentran). Para ello, se seleccionarán unas muestras significativas en la imagen (pixeles muestrales de clasificación) y en el terreno (u objeto real) con vistas a la interpretación real de dichas muestras, etiquetándose posteriormente todos los pixeles con criterios estadísticos (cálculos de probabilidad), finalmente se agruparán formando las diversas clases definitivas.

Las fases a seguir serían las siguientes:

- Definición de clases finales a obtener.
- Selección de muestras significativas en el terreno y su correspondiente identificación en la imagen para cada clase. Con ello podremos conocer el conjunto de valores espectrales (ND/banda) para cada objeto y, por tanto, su centro de clase (media).
- Definición del **clasificador** en función de dichos valores muestrales.
- Designación de cada pixel a cada clase muestral por métodos estadísticos.
- Obtención de la imagen raster clasificada.

Los **clasificadores** más habituales son los siguientes:

Método del paralelepípedo

Se define el rango de valor máximo y mínimo radiométrico (ND) para cada clase por banda y posteriormente se asigna cada pixel a cada clase (paralelepípedo).

Este método puede dejar pixeles sin clasificar o solapamientos entre clases. Es el método más simple de clasificación. Su expresión para la clase i sería:

$$C_i = \left(\bigcup \Delta x_{i-j}^t \right)$$

Siendo:

$C = (C_1 \dots C_n)$ el conjunto de clases a clasificar.

Δx_{i-j}^t = Rango de valores radiométricos en cada banda

t = nº de bandas.

i-j = rango de valor radiométrico (ND).

Método de la máxima distancia

Este método emplea el valor de la **media** como **centro - c -** de toda clase definida a priori.

$$c = \frac{\sum x_{i,j}^t}{n}$$

Siendo **n** el número de pixeles de la clase perteneciente al intervalo **(i-j)** de la banda **t**.

A partir de ese valor, calcularíamos la distancia euclídea de cada pixel a los centros más próximos, incluyéndolo en una clase u otra en función de unos criterios de distancia máxima o mínima a los mismos.

Máxima probabilidad

A partir del centro conocido de cada clase, se realizan estudios de **probabilidad** de cada pixel en cuanto a su pertenencia a una determinada clase. Para ello, se calcula la varianza y correlación de las diferentes clases espectrales (se considera que la distribución de datos – valores radiométricos/ banda– es **normal**).

De tal forma que cada clase se podría definir por su media y matriz de covarianzas (varianza y correlación).

A continuación, se asigna cada pixel a cada clase (espacio estadístico) mediante cálculo de probabilidad.

La pertenencia o no de un pixel a una clase determinada se realiza según las teorías probabilísticas de Bayes.

Este último método es el más lento, pero es el que nos daría un porcentaje más alto de acercamiento a la realidad (exactitud) en un proceso de clasificación automática.

3.3. Aplicaciones de la Teledetección

Las aplicaciones de la teledetección se multiplican cada año debido a los factores de mejora de imagen (en todos sus componentes) y de tratamiento (en su rapidez de cálculo y de desarrollo de modelos). Ello a propiciado que, en el momento actual, los sistemas de información territorial, en su aspecto topográfico y temático, se basen en gran medida en esta tecnología.

A continuación, como introducción en el mundo de las aplicaciones, se enumeran algunos proyectos de Gestión Territorial donde la teledetección ha sido el componente básico.

3.3.1. Aplicaciones a la Cartografía Topográfica

Este campo tradicionalmente realizado con éxito por la topografía y fotogrametría, ha sido ocupado recientemente por la teledetección, tanto en sus aspectos altimétricos (generación automática de Modelos Digitales del Terreno – MDT), como planimétricos (detección automática de formas, generación semiautomática (raster) de contornos, etcétera).

La fotogrametría digital se puede considerar la convergencia entre los métodos tradicionales fotogramétricos (analógicos y analíticos) y el tratamiento digital de imágenes (sistemas de procesamiento tradicional de la teledetección).

3.3.1.1. Generación automática de Modelos Digitales del Terreno (MDT)

La obtención de información altimétrica del terreno ha sido tradicionalmente un aspecto de gran importancia, tanto en su aspecto técnico como económico. Por ello, conviene recordar, que por técnicas convencionales de fotogrametría (restitución altimétrica de curvas de nivel), el costo de ejecución ha sido superior al 50% del total del proyecto de restitución, siendo asimismo un proceso con una difícil homogeneización en grandes extensiones, por la subjetividad que conlleva dicho sistema.

La generación de información altimétrica por **estereocorrelación automática de imágenes digitales**, se presenta hoy día como la gran herramienta de obtención de dicha información, con estructura final de Imagen Digital (MDT) y siendo sus principales características la gran objetividad de dicha Base de Datos (lo que posibilita que sea repetible en el espacio y el tiempo) y con exactitud similar a las restituidas por métodos tradicionales.

Es importante resaltar que a partir de un MDT, la obtención de curvas de curvas de nivel (información vectorial del territorio) es un proceso de fácil consecución hoy día mediante técnicas de interpolación automática.

El Proceso de estereocorrelación automática se basa fundamentalmente en los siguientes **principios**:

- **Geometría epipolar**

Los planos epipolares cortan a los planos focales según rectas (rayos epipolares), cuya característica fundamental es que conocida la imagen de un punto en un fotograma, la de su homólogo en la imagen adyacente, se encuentra fácilmente a partir de la reconstrucción de los rayos epipolares correspondientes. Para reconstruir dicha geometría epipolar, se hace necesario previamente efectuar una modelización de las imágenes (epipolarización) con vistas a conseguir que las líneas de las imágenes sean rayos epipolares.

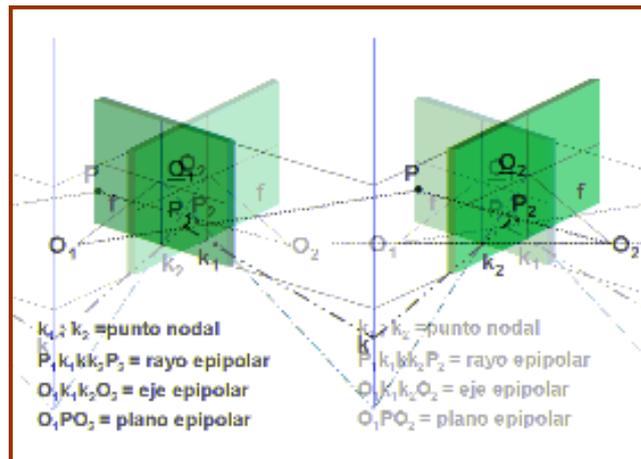


Fig. 23.- Teoría epipolar.

- **Estereocorrelación por relajación jerarquizada**

Su objetivo es el conseguir una mayor eficacia de búsqueda de puntos omólogos mediante la obtención de imágenes resumidas de resolución cada vez menor, lo que redundará en una mayor rapidez de cálculo. Se inicia la búsqueda en unas imágenes muy resumidas (puede llegar a 1:64 de tamaño de pixel) aumentándose la resolución y, por tanto, la búsqueda hasta las imágenes originales (1:1) en forma jerarquizada.

- **Cálculo de la altitud del punto mediante la obtención de paralajes**

Se sabe por técnicas fotogramétricas que la diferencia de cota de un punto respecto de otro (ΔH) está relacionada directamente con la diferencia de paralajes, medidas en cada fotograma.

$$\Delta H = f(\Delta \text{Paralajes})$$

Para ello, se calcula la paralaje entre puntos homólogos de las imágenes, restringiéndose y facilitándose la búsqueda y posterior cálculo con los criterios anteriormente citados.

- **Edición interactiva**

Esta fase final servirá mediante técnicas adecuadas de visualización (anaglifos o polarización) la correcta obtención del MDT y su posible corrección por técnicas interactivas:

- punto a punto,
- por superficies,
- por perfiles.

Las **fases** de ejecución en el proceso de obtención de un MDT, serían:

■ **Definición de la escala final del documento cartográfico (e_M) o exactitud de la Bases de Datos correspondiente.**

Ejemplo:

Escala final $e_M = 1/E_M = 1: 10.000$

Exactitud: Tolerancia (errores máximos admisibles) ≤ 2 m

■ **Definición adecuada de la escala (e_v) y características del vuelo.**

La selección de la escala de vuelo ($e_v = 1/E_v$) se realizará en función de la escala del documento cartográfico (y por tanto de la tolerancia final admitida).

Ejemplo:

Escala final del vuelo $E_v = 200\sqrt{E_M} = 200\sqrt{10.000} = 20.000$

Cámara métrica con objetivo gran angular ($f = 152$ mm)

■ **Definición del tamaño del pixel (Tpx) en el proceso de conversión Analógica/Digital (escaneado) de los fotogramas obtenidos con la cámara métrica**

El Tpx estará condicionado por:

- Errores máximos admisibles en el documento cartográfico.
- La unidad mínima de resolución final (UMR).
- El proceso de ejecución (aerotriangulación y cálculo del MDT).
- Volumen de información (almacenaje) y proceso de cálculo.

La UMR se define en función de la **agudeza visual**, que en forma digital podemos considerar es de $100 \mu\text{m}$.

Se suele considerar que es adecuado en la identificación de objetos un cuarto de dicha UMR. Por lo tanto, el Tpx con este criterio, sería de $25 \mu\text{m}$.

Asimismo, según Boneval, el error cometido en “z” en el proceso digital de imágenes es:

$$e_z = (f \cdot E_v \cdot e_p) / b$$

Siendo:

f = focal

b = base del modelo estereoscópico

E_v = denominador de la escala de vuelo

e_p = error de cálculo de paralajes

El valor de $e_p = c \cdot \text{Tpx}$. Siendo, **c** función de la morfología del terreno, con valores próximos a la unidad.

Ejemplo:

- Con el primer criterio (UMR de 100 μm) y $e_M = 1: 10\ 000$

$$\text{UMR} = 0,1 \cdot 10\ 000 = 1\ \text{m}$$

$$\text{UMR} / 4 = 25\ \mu\text{m} \Rightarrow \mathbf{0,25\ \text{m}}$$
 (a escala final 1: 10 000)

A escala de vuelo 1: 20 000 \Rightarrow

$$\text{Tpx} = \mathbf{12,5\ \mu\text{m}\ (0,25\ \text{m})}$$

- Con el criterio de Boneval:

$$e_z = (f \cdot E_v \cdot e_p) / b$$

$$1 \geq (0,152 \cdot 20\ 000 \cdot 0,6 \cdot \text{Tpx}) / 0,07$$

Considerando una $b = 7\ \text{cm}$

$$c = 0,6\ (\text{terreno ondulado suave})$$

$$\text{Tpx} = \mathbf{35\ \mu\text{m}\ (0,7\ \text{m})}$$

Es decir, el escaneado del vuelo 1: 20 000, con el criterio de exactitud, debería estar entre:

- $\text{Tpx} = 12,5\ \mu\text{m}$ (criterio UMR)
- $\text{Tpx} = 35\ \mu\text{m}$ (criterio de Boneval)

Podríamos seleccionar el más restrictivo (12,5 μm).

En cualquier caso, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El Tpx es siempre bastante menor que la tolerancia final del documento (100 μm).
- Todos los procesos (aerotriangulación, estereocorrelación) añadirán errores a los píxeles, pero siempre dentro del margen entre los 12,5 μm y 100 μm .

■ Definición del paso de malla en la generación del MDT

Se realiza teniendo en cuenta:

- El tamaño del píxel (Tpx).
- La escala final del documento cartográfico.

Ejemplo:

Seleccionamos un paso de malla de 5 m = doble de la tolerancia.

■ Proceso de estereocorrelación

En función del tipo del terreno y de las características radiométricas de la imagen se definirán:

- El tamaño de la ventana de correlación.
- Zona de búsqueda de los puntos homólogos en las imágenes.
- Parámetros de la estereocorrelación (umbrales de aceptación de la correlación).
- El n°. de iteraciones a realizar según el ancho el ancho de malla.

Ejemplo:

Finalmente se obtendrá el MDT con las características antes definidas:

- Para una malla de 5 m.
- Cálculo de su altitud con un error medio cuadrático ≤ 1 m.

■ Edición final

Mediante visualización del MDT sobre la imagen y de forma interactiva, se revisarán y corregirán puntualmente las zonas en las que se detecte un error inadmisibles.

■ Comprobaciones finales

Se efectuarán mediante puntos de control y estimadores de exactitud de cada imagen digital (MDT).

■ Obtención de las curvas de nivel (en los casos que se requiera)

Por técnicas automáticas de interpolación y utilizando previamente filtros digitales en ciertas zonas (filtro de paso bajo - FPB) y con la integración de líneas singulares con cota conocida (divisoria y vaguada), se procederá al curvado definitivo.

De esta forma, obtendríamos finalmente dos tipos de información altimétrica de la misma zona.

- MDT (**fichero raster**) con paso de malla de 5 m y e.m.c. ≤ 1 m.
- Curvas de Nivel (**fichero vectorial**) con exactitud nominal ≤ 2 m.

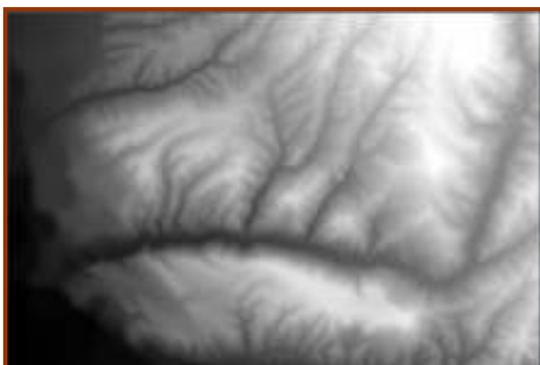


Fig. 24.- Modelo digital del terreno en escala de grises.

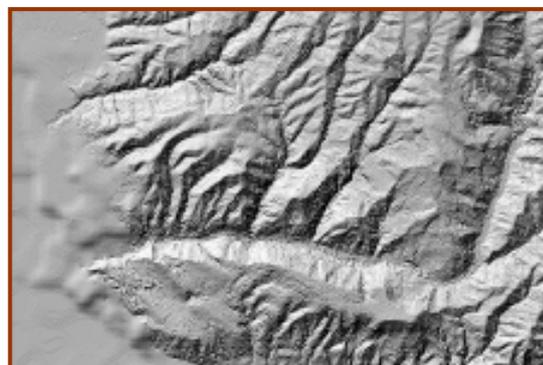


Fig. 25.- Modelo digital del terreno visualizado con relieve

3.3.1.2. Producción electrónica de documentos cartográficos

La producción electrónica utiliza los sistemas digitales existentes en el tratamiento de la información tanto en sus fases de **captura y procesamiento**, como de salida o **explotación** de la misma.

Dicha información estará compuesta de diferentes fuentes y estructuras con imágenes, gráficos, texto, etc., pero siempre en forma digital.

Por ello, y una vez estudiado el tratamiento de imágenes, tienen especial importancia en el proceso electrónico de documentos, el análisis de los sistemas de conversión de formato analógico a digital (captura) –ADC– y de digital a analógico (salidas) –DAC– de las citadas fuentes.

La producción electrónica, como ya se ha indicado anteriormente, se realizará siempre sobre un formato digital de la información. Dicho formato digital podrá ser en origen en forma digital (creado por los programas correspondientes) en todas sus fuentes (texto, imagen, gráficos, etc.) dando lugar a los **documentos digitales**, o bien proceder de la conversión analógica/digital (escaneado) de documentos analógicos, llamándose entonces **documentos digitalizados**.

Conviene recordar que se conoce como **documentos multimedia**, aquellos documentos compuestos de diferentes fuentes y estructuras que incorporan no sólo documentos digitales o digitalizados, sino también a los procedentes de otros tipos de señales, como son audio y vídeo; por ello, todo documento multimedia es digital en sí mismo.

Para la **edición electrónica** se necesitan los conocimientos de las siguientes técnicas y herramientas:

- Estudio de formatos y métodos de compresión según fuentes y tipo de explotación.
- Definición de flujos de información y de trabajo.
- Gestión documental, donde a su vez se incluyen los siguientes procesos:
 - Sistemas de tratamiento:
 - Preparación de documentos.
 - Reconocimiento de formas.
 - Mejoras y ajustes, etcétera.
 - Composición de páginas y maquetación.
 - Sistemas de catalogación, clasificación y consulta.
 - Sistemas de entrada/salida.
- Sistemas de almacenamiento de la información en función de los sistemas de gestión documental necesarios y del tipo de explotación (**on line**, **off line** y servidores correspondientes).
- Sistemas de control de calidad.

3.3.1.2.1. Adquisición de información. Transformación analógica /digital

Este epígrafe corresponde a la obtención de documentos digitalizados a partir de información analógica existente (fotos, mapas, texto impreso, gráficos, etc.). Su ejecución estará condicionada por la forma de explotación última (digital o analógica) y por la calidad del documento origen.

El método más empleado es el escaneado, siendo la correcta definición de sus parámetros de trascendental importancia para la consecución de la calidad necesaria en el procesamiento y posterior explotación de dichos datos.

Los parámetros más significativos a definir en dicha transformación serán los siguientes:

- **Resolución de la imagen escaneada (R)**

Obtenida por la discretización de la “Imagen continua” en pixeles. Se expresa en pixeles por pulgada (muestras por pulgada – **spi** –).

Esta captura se realiza directamente por medios ópticos o por interpolación mediante programas.

- **Profundidad del pixel (PP)**

Se cuantifica en bits por pixel, dándonos el número máximo de niveles de gris por pixel (ND).

Se conoce como **rango dinámico** el número de ND que serían susceptibles de ser definidos entre el blanco y el negro.

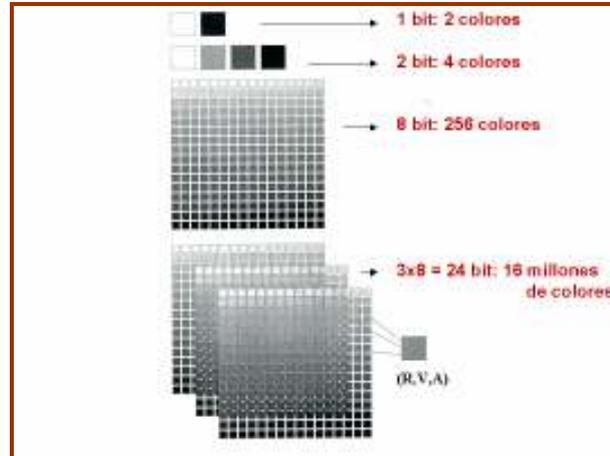


Fig. 26.- Imágenes escaneadas. Profundidad del pixel.

- **Tamaño de la imagen (T)**

El tamaño de la imagen a escanear en sus dos dimensiones (ancho y alto) se puede expresar en mm^2 , cm^2 o pulgadas^2 (i^2).

Si se conoce su tamaño y resolución, conoceremos el **volumen de información (VI)**.

$$VI \approx (R^2 \times T \times PP)/8000 \quad \text{Kbytes}$$

Se define como **escalado**, el cambio de resolución de la imagen al ampliar o reducir. Si se cambia la resolución, cambiará el volumen de información o el tamaño.

Para terminar, conviene recordar que no es necesario ni apropiado escanear una imagen a más del doble de la frecuencia de la trama con la que se reproducirán los medios tonos en el proceso de impresión final, dado que ocasionaría un volumen de almacenamiento y de tratamiento inaceptable e inútil para el sistema de explotación final (estos conceptos se revisarán a continuación).

3.3.1.2.2. Salidas de la información

Son todos los procesos necesarios que convierten la información digital procesada, en información disponible por el usuario. Dicha **conversión**, se realizará en función del sistema de explotación utilizado posteriormente (analógico o digital).

Dichos procesos se pueden dividir en los siguientes sistemas de explotación o conversión:

■ **Conversión y explotación digital en analógica**

La utilización de documentos impresos, bien obtenidos directamente por una **impresora** (número de copias reducido), o bien a través de sistemas masivos de reproducción, como puede ser la **litografía (offset)**, sigue siendo, de momento, el sistema más importante de transmisión de información y conocimiento. En ambos casos, la transformación de la información digital a analógica se realiza previamente mediante los **RIP** (Raster Image Processing) que transforman a bits de la **impresora** o **filmadora** la información digital.

En el caso de la **litografía**, el sistema de producción necesita de un proceso intermedio que sería la conversión del fichero digital en película fotográfica (transformación de la imagen digital en **medios tonos digitales**) y posteriormente, pasado a plancha de impresión e impresión sobre máquina de reproducción litográfica. Todos estos últimos procesos se hacen de forma analógica.

En el proceso de **filmación**, la definición, a priori, de los parámetros necesarios requeridos en la **plancha de reproducción** y, por lo tanto, en su equivalente **positivo de reproducción** serán de trascendental importancia con vistas a obtener la calidad de copias finales solicitadas.

Conviene recordar los siguientes conceptos:

- La imagen digital se compone de píxeles/muestras y se dimensiona en píxeles por pulgada – **spi** –.
- Dicha imagen visualizada en pantalla se expresa en píxeles por pulgada – **ppi** –.
- La transformación de la imagen digital en **medios tonos digitales**, para su reproducción en offset, se dimensiona en líneas (celdas) por pulgada – **lpi** –. En estas celdas, se alojarán los **puntos** que formarán – una línea –. La forma y constitución de dicha línea será de gran importancia a la hora

de evitar ciertos problemas (efecto moiré) o resaltar ciertos detalles (contrastes, transiciones, etcétera).

- La resolución de salida de la filmadora se expresa en puntos por pulgada – **dpi** –, que constituyen y forman cada celda o línea.

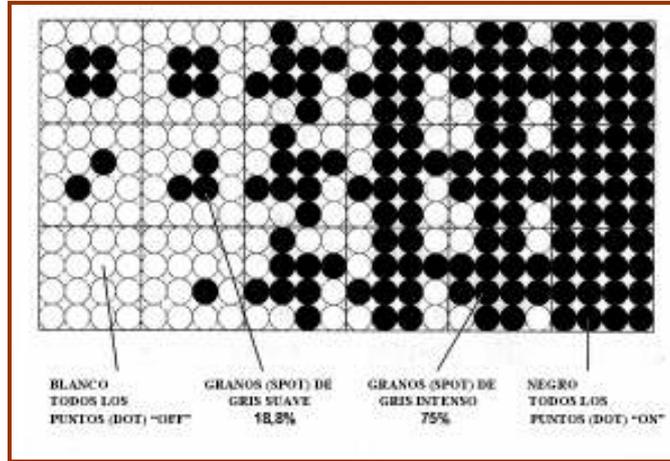


Fig. 27.- Representación de: puntos (DOT); granos (SPOT); celdas (CÉLULAS)

Los parámetros de formación de **positivos de reproducción** en el proceso de filmación se pueden resumir, por tanto, en los siguientes:

- Resolución de salida (RS) de la filmadora – **dpi** –.
- Frecuencia de tramas (FT) – **lpi** –. Suele mantener la siguiente relación con la Imagen Original: $spi \geq lpi$
- Niveles de grises/plancha, requeridos (ND). Serán función del número de punto por celda. Así, con celdas cuadradas de 4x4 (16 puntos) podríamos obtener un máximo de 17 ND.
- Ángulo de trama. Cada plancha (color) tendrá una angulatura determinada (30° de diferencia entre ellos), con vistas a eliminar efectos visuales desagradables, como es el moiré.

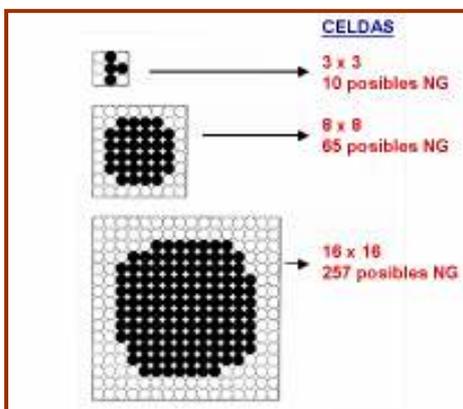


Fig. 28.- Puntos por celda y niveles de gris (NG)

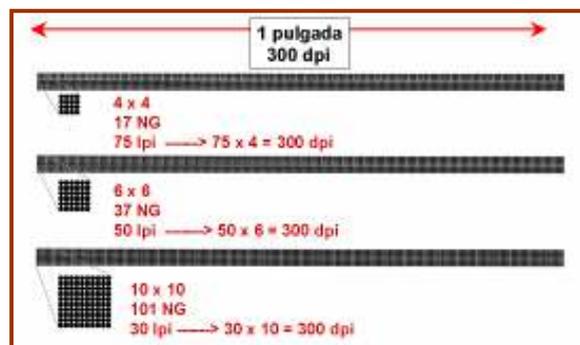


Fig. 29.- Medios tonos a una misma resolución de salida (RS) 300 dpi.

Todas estas variables se relacionan y condicionan entre sí. La expresión más utilizada es la que a continuación se expone:

$$ND = (RS/FT)^2 + 1$$

■ **Explotación directa de la información digital**

Esta forma de transmisión y comunicación de información digital es y será el sistema de información masivo entre todo tipo de usuarios. El primer paso para la explotación directa, dado que la información ya es digital, será la grabación y distribución de la misma sobre soportes digitales CD-ROM o DVD, en todas sus variantes y capacidades existentes.

En un futuro inmediato (prácticamente presente), dicha transmisión se realizará a través de redes de Área Local (Fast Ethernet, FDDI, FDI, ATM, ...) y muy especialmente a través de Internet.

En estos sistemas, cobra especial importancia los procesos de compresión de imágenes (audio, vídeo, etc.), velocidad de comunicación y, así mismo, la capacidad de utilización de dicha información en forma eficaz por un amplio sector de usuarios, sin necesidad de estar condicionada por programas o equipos.

Con este último concepto de independencia de programas y equipos, habría que destacar, como ideas innovadoras las ofrecidas por:

● **Formato de Documento Portátil (PDF) de Adobe**

Este formato, casi considerado como un dialecto Postscript, de intercambio de información digital, se caracteriza por los siguientes conceptos:

- Es un formato de imagen, sonido, hipertexto, ...
- Sus páginas se pueden considerar a la hora de leer y modificar como independientes de la plataforma en la que fueron creadas (no es necesario tener, por tanto, ni la aplicación ni los elementos que lo componen).
- Se puede considerar que cada página es independiente del total, lo que facilita los procesos de preimpresión e imposición de páginas.
- Admite modificaciones parciales hasta en el último momento (editabilidad).
- Posibilita la utilización múltiple (reutilización) de la misma información (CD-ROM, Web, ...).
- Admite la posibilidad de trabajar sobre servidores OPI.
- Se puede considerar estos archivos como “**Película Digital**”, es decir, la posibilidad de integrar páginas **.pdf** en otras aplicaciones de edición (PageMaker, Xpress, In- Design, ...).

- Introduce nuevos flujos de trabajo en la producción electrónica, más flexibles y económicos.
- **Lenguaje de Información Autodescriptiva (XML).**
Este lenguaje proporciona un estándar abierto y flexible de almacenaje, publicación e intercambio de información electrónica. Sus características más importantes son:
 - Ha sido desarrollado con vistas a transformarse en un estándar por la World Wide Web Consortium (W3C).
 - Puede llegar a ser un estándar que nos proporcione la independencia del formato de datos y fuentes de donde proceden.
 - Lenguaje de fácil aprendizaje e implementación en las diversas plataformas.
 - Permitirá intercambiar información entre diversas plataformas y usuarios de cualquier lugar (base de los “negocios electrónicos”).
 - De gran trascendencia en el futuro de las Bases de Datos en cuanto a su gestión, ya que maneja documentos y no solo datos.

3.3.2. Aplicaciones a la Cartografía Temática

Las aplicaciones medioambientales fueron, desde los orígenes de la teledetección espacial (1972), en donde dicha tecnología tuvo su principal actividad y mayor utilidad.

Hoy día, la teledetección contribuye de forma única y eficaz al conocimiento global de los ecosistemas terrestres y su dinámica. Estudios de desertificación, de evaluación de impactos, de ocupación del suelo, etc, serían de gran dificultad en su ejecución si no fuese por la información disponible (espacial, temporal, radiométrica y espectral) facilitada a través de las imágenes digitales desde satélites artificiales.

3.3.2.1. La Cartografía de Ocupación del Suelo en la determinación del Índice de Peligro de Incendios Forestales (IPIF)

Los sistemas que estudian ciertos factores de predicción, como es el caso de los incendios forestales, utilizan una metodología mixta basada en **modelos**, cuyas componentes proceden a su vez de ciertas variables obtenidas, fundamentalmente, a partir de datos espaciales suministrados por sensores aerotransportados.

Asimismo, en el cálculo de dicha modelización, es imprescindible la utilización mixta de técnicas y datos raster y vectorial, lo que, no sólo actualmente es factible, si no que incrementa la eficacia de los resultados (exactitud y rapidez).

Por tanto, las técnicas de tratamiento digital de imágenes (TDI) usadas en teledetección, junto con los sistemas de información geográfica (SIG), son instrumentos que se utilizan de forma integrada y complementaria en estudios de medio ambiente en general.

El proyecto que se presenta a continuación (peligrosidad de ocurrencia de incendios forestales), sólo tiene en cuenta factores físicos (no antrópicos) y su resolución espacial está condicionada por los sensores utilizados en cada momento.

No obstante, los resultados de este tipo de estudios son de gran utilidad para la distribución de medios técnicos y para la planificación a priori de defensa y lucha contra el evento.

Las **fases** de que consta este proyecto (determinación de áreas de peligrosidad de incendios forestales), son las siguientes:

■ **Determinación de la Cantidad de Combustible vivo (C_v) y muerto (C_m) por unidad de superficie**

- Para ello se parte del mapa de **ocupación del suelo del territorio**. En este ejemplo se utilizó el mapa de ocupación del suelo de la Unión Europea con las siguientes características:
 - Área de estudio: el Territorio Nacional ($\pm 500\ 000\ \text{km}^2$).
 - Escala: 1: 100 000.
 - Superficie mínima a representar: 25 Ha.
 - Nomenclatura: Corine Land-Cover (UE). Con 5 niveles y 64 clases.
 - Datos: satélite Landsat-5; sensor Thematic Mapper; bandas utilizadas 5 (1,55-1,75 μm), 4 (0,76-0,90 μm), 3 (0,63-0,69 μm).
 - Tamaño del pixel (Tpx): 30 m. Remuestreado a 25 m.
 - Captura de información temática: fotointerpretación asistida por ordenador (clasificaciones supervisadas y no supervisadas).
- A partir del mapa de Ocupación del Suelo se obtiene, mediante modelos de combustibilidad, facilitados por los servicios forestales, el **Mapa de Combustibles**.
- Finalmente, a partir de dicho Mapa de Combustibles se identifica y se calcula (según los modelos utilizados en los servicios forestales) por unidad de superficie:
 - **La Carga en Tn/Ha de Combustible vivo (C_v).**
 - **La Carga en Tn /Ha de Combustible muerto (C_m).**

■ **Determinación del Material Combustible vivo y muerto por pixel y en un instante dado a partir del cálculo del Verdor Relativo (según la fecha de las imágenes utilizadas en dicho cálculo)**

- Previamente, se necesita conocer el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN) en una fecha determinada (la de las imágenes del sensor utilizado).
En nuestro caso, para el cálculo del IVDN se utilizaron imágenes del satélite NOAA (sensor AVHRR), con las siguientes características:

- Tpx : igual a 1,2 Km. Remuestreado a 1 Km.
- Bandas utilizadas: Infrarrojo próximo (0,7-1,1µm) y Rojo (0,5-07 µm).
- Periodicidad: 2 imágenes/mes.

Con estos datos se calcula (de forma automática) por pixel el IVDN, para cada fecha:

$$\text{IVDN} = (\text{ND}_{\text{IR}} - \text{ND}_{\text{R}}) / (\text{ND}_{\text{IR}} + \text{ND}_{\text{R}})$$

Siendo:

$$\text{ND}_{\text{IR}} = \text{valor digital /pixel en el Infrarrojo.}$$

$$\text{ND}_{\text{R}} = \text{valor digital / pixel en el Rojo.}$$

- A partir de dicho Índice, calcularemos el Verdor Relativo (VR), según la ecuación siguiente:

$$\text{VR} = [(\text{IVDN} - \text{IVDN}_{\text{min}}) / (\text{IVDN}_{\text{max}} - \text{IVDN}_{\text{min}})] \cdot 100$$

- El cálculo de Material Combustible vivo y muerto por pixel, se calcula según las ecuaciones siguientes:

- Material de Combustible vivo (MCv/px):

$$\text{MCv/px} = \text{VR} \cdot \text{Cv}$$

- Material de Combustible muerto (MCm/px):

$$\text{MCm/px} = [(1-\text{VR}) \cdot \text{Cv}] + \text{Cm}$$

■ **Cálculo de la humedad del material combustible muerto (hMCm) a las 10 horas de retardación (h₁₀)**

“ Se entiende como retardación, la medida de la rapidez con la cual una partícula de combustible alcanza el contenido de equilibrio con la atmósfera” (Servicio Geológico de EE UU – USGS).

- Para su cálculo se utilizarán valores de temperaturas, humedad relativa (%) y nubosidad, procedentes de sensores instalados en los satélites NOAA y Meteosat, corregidos según estaciones meteorológicas terrestres e interpolando los valores para cada pixel.

Por tanto:

$$hMCm = h_{10} / h_e \text{ Cm}$$

Esta expresión se utilizará como factor de corrección sobre el material de combustible muerto.

Siendo:

h_{10} = la humedad según períodos de 10 horas

h_eCm = humedad de extinción del fuego del Combustible muerto.

■ **Cálculo del Índice de Peligrosidad de Incendios Forestales (IPIF)**

Con los valores obtenidos de Verdor Relativo (VR), Material Combustible vivo (MCv) y muerto (MCm) y la humedad de retardación del Combustible muerto (hMCm) y utilizando, en nuestro caso, las posibilidades de cálculo de ArcInfo (mediante el cálculo de los ficheros .aml), obtenemos finalmente, según el modelo adjunto:

El Índice sin corregir:

$$IPIF_{sc} = 100 - [(VR \cdot MCv) + (hMCm \cdot MCm)] \cdot 100$$

El Índice corregido por pixel:

$$IPIF = IPIF_{sc} + [(2 / hCm) (IPIF_{sc} / IPIF_{max})] \cdot 100$$

Siendo:

hCm = humedad del Combustible muerto

■ **Validación de resultados**

Esta última fase se realiza mediante el contraste (comparación de datos) de ocurrencias con los incendios que realmente se han producido, necesiándose conocer para ello la fecha y las coordenadas del foco principal (en su defecto coordenadas del perímetro del incendio).

Con estos modelos de predicción se han obtenidos coincidencias superiores al 90% de las zonas estudiadas.

Conviene resaltar que estos modelos podrían servir para cálculos de Peligrosidad de Incendio Forestal casi en tiempo real (1 día u horas de retraso), debido a que actualmente los satélites nos proporcionan información exhaustiva diaria y los métodos de cálculo son lo suficientemente potentes como para realizarlos al mismo tiempo que son proporcionados los datos.

3.4. Bibliografía

- AROZARENA, A. et al., *Aplicaciones de las imágenes espaciales a la cartografía de base*, Teledetección y planificación integrada del territorio, MOPU, Madrid, 1989, pp.215-223.
- AROZARENA, A., *La Teledetección en el IGN*, Rev. Mapping, 8, 1992.
- AROZARENA, A., *Cartografía Digital de Imagen (CDI), como Sistema Básico de Información Territorial*, Homenaje a D. Angel Ramos Fernández (1926-1998), R.A. Ciencias E., F. y Naturales, Academia de Ingenieros, ETSIM (UPM), Madrid 1999, pp. 329-350.
- AROZARENA, A; DEL BOSQUE, Isabel, *Base de Datos Geográficos sobre La Ocupación del Suelo en el litoral de Marruecos mediante Teledetección (Proyecto MEDGEOBASE)*, ed. CNIG/IGN, Madrid 2001.
- BLATNER, D.; ROTH S., *Real World Scanning and Halftones*, ed. Peachpit Press, Berkeley, 1993.
- CAMPBELL, J. B., *Introduction to Remote Sensing*, ed. Guilford Press, 1996.
- COURTEIX, S. et al., *Droit Télédétection et Environnement*, ed. SIDES, 1994.
- GARCÍA SOLANO, M.D. (tesis doctoral), *Normalización de la Nomenclatura Cartográfica de Cobertura/Usos del Suelo* Universidad de Murcia; 1999.
- GIBSON J.D. et al., *Digital Compression for Multimedia, Principles & Standards*, ed. Morgan Kaufmann, 1998.
- GIBSON, P.; POWER, CLARE H., *Introductory Remote Sensing Principles and Concepts*, ed. Routledge, 2000.
- GONZÁLEZ RAFAEL C.; WOODS, RICHARD E., *Digital Image Processing*, ed. Addison-Wesley, Massachusetts, 1992.

- JENSEN, J. R., *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*, ed. Prentice Hall, 1995.
- JENSEN, J. R., *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, ed. Prentice Hall, 2000.
- JIA, XIUPING, *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, ed. Springer Verlag, 1999.
- LILLESAND, THOMAS M.; KIEFER, RALPH W., *Remote Sensing and Image Interpretation*, ed. John Wiley and Sons, New York, 1999.
- LLIBOUTRY, L., *Sciences Géométriques et Télédétection*, ed. Masson, Paris, 1991.
- MARION, A., *An Introduction to Image Processing*, ed. Chapman and Hall, London, 1991.
- MATHER, PAUL M., *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction, 2nd Edition*, ed. John Wiley and Sons, 1999.
- SCHOWENGERDT, ROBERT A., *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, ed. Academic Press, 1997.
- WILLIAMS, J., *Geographic Information from Space*, ed. John Wiley and Sons – Praxis, Chichester, 1995.

3.4.1. Direcciones de Internet

www.ais.sai.jrc.it

www.ccrs.nrcan.gc.ca

www.ceo.org

www.cnes.fr

www.cnig.ign.es

www.crepad.rcanaria.es

www.digitalglobe.com

www.digitalimaging.org

www.earsel.org

www.EarthEtc.com

www.eionet.eu.int

www.erdas.com

www.ermapper.com

www.estec.esa.nl

www.eurimage.it

www.eurisy.asso

www.euromap.de

www.europto.org

www.geo.ign.es

www.geogra.alcala.es

www.globexplorer.com

www.jpl.nasa.gov

www.jrc.org

www.mfom.es

www.millennium-map.com

www.nasa.gov

www.orbimage.com

www.remotesensing.org

www.sai.jrc.it

www.satellus.se

www.spaceimaging.com

www.spotimage.fr

www.ssc.se

www.telnet.uva.es

www.usgs.gov