

# Topografía Aplicada a la Ingeniería

## Unidad Didáctica 1. Modelos digitales del terreno



**Julio Manuel de Luis Ruiz**  
**Raúl Pereda García**

Departamento de Ingeniería Geográfica y  
Técnicas de Expresión Gráfica

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

# ESTRUCTURA

## **1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

- 1.1. CONCEPTO DE MODELO.**
- 1.2. MODELOS DIGITALES DEL TERRENO (MDT).**
- 1.3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS MDT.**
- 1.4. MODELOS DIGITALES Y MODELOS ANALÓGICOS.**
- 1.5. JUSTIFICACIÓN Y PRINCIPIOS METODOLÓGICOS.**

## **2. ESTRUCTURA DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO**

- 2.1. INTRODUCCIÓN.**
- 2.2. MODELO VECTORIAL.**
- 2.3. MODELO RÁSTER O TESELAR.**
- 2.4. OTRAS ESTRUCTURAS.**
- 2.5. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL MDE.**
- 2.6. RASTERIZACIÓN Y VECTORIZACIÓN.**

# ESTRUCTURA

## **3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL**

- 3.1. MÉTODOS DIRECTOS.**
- 3.2. MÉTODOS INDIRECTOS.**

## **4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN**

- 4.1. FUNCIÓN INVERSA DE LA DISTANCIA.**
- 4.2. ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES DE TENDENCIA.**
- 4.3. INTERPOLACIÓN SEGÚN EL MÉTODO “KRIGING”.**

## **5. GENERACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO**

- 5.1. INTRODUCCIÓN.**
- 5.2. TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.**
- 5.3. MODELOS DIGITALES DEL TERRENO CONSTREÑIDOS.**

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1. Concepto de modelo

### DEFINICIÓN DE MODELO.-

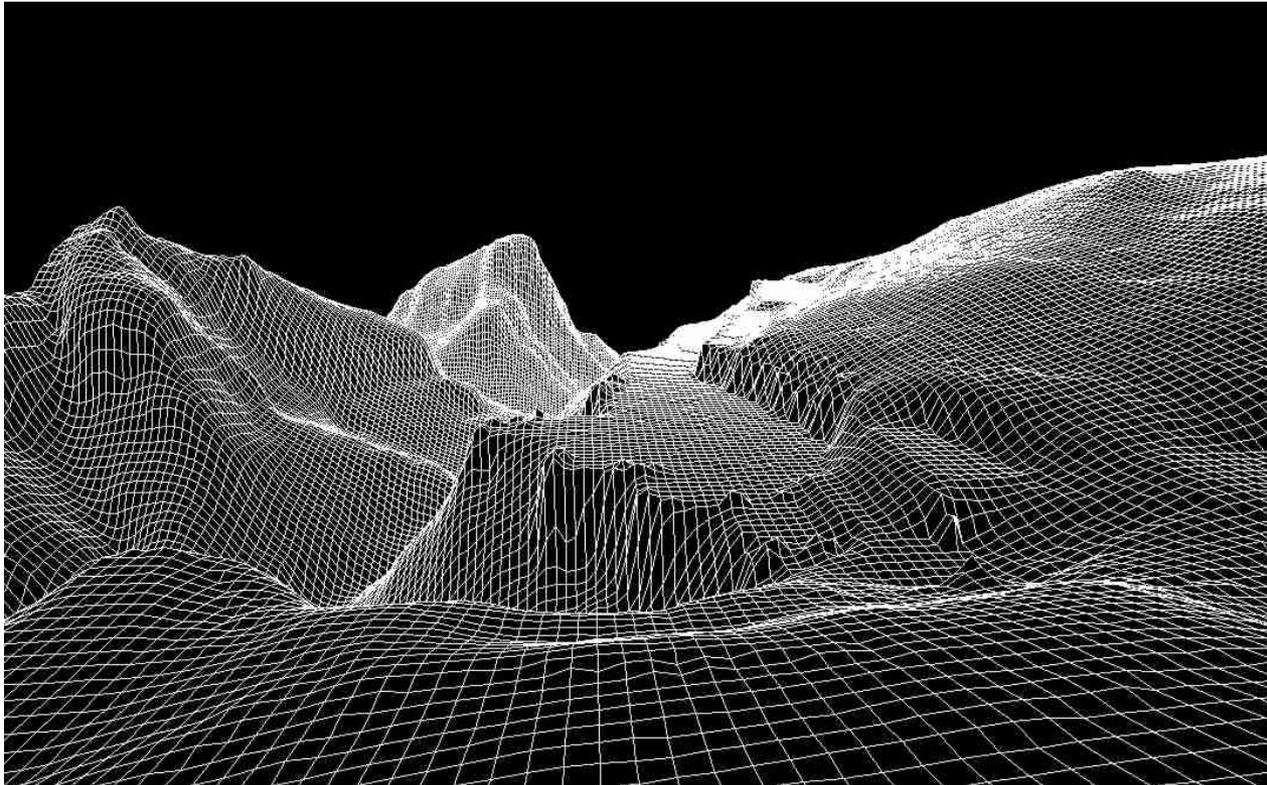
Para solucionar un gran número de problemas prácticos, existentes en muchas áreas de la actividad humana, es habitual realizar medidas para crear modelos del mundo real, a partir de los cuales es posible conseguir un cierto conocimiento sobre los objetos que son medidos y plantear la mejor solución posible para el problema suscitado.

Una acepción de la palabra modelo, originada en ámbitos geográficos, la define como *“una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades”*. De esta definición se deduce que la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que, por lo tanto, se ve representado por otro objeto de menor complejidad.

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1. Concepto de modelo

### DEFINICIÓN DE MODELO.-



# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1. Concepto de modelo

### TIPOLOGÍA DE MODELOS.-

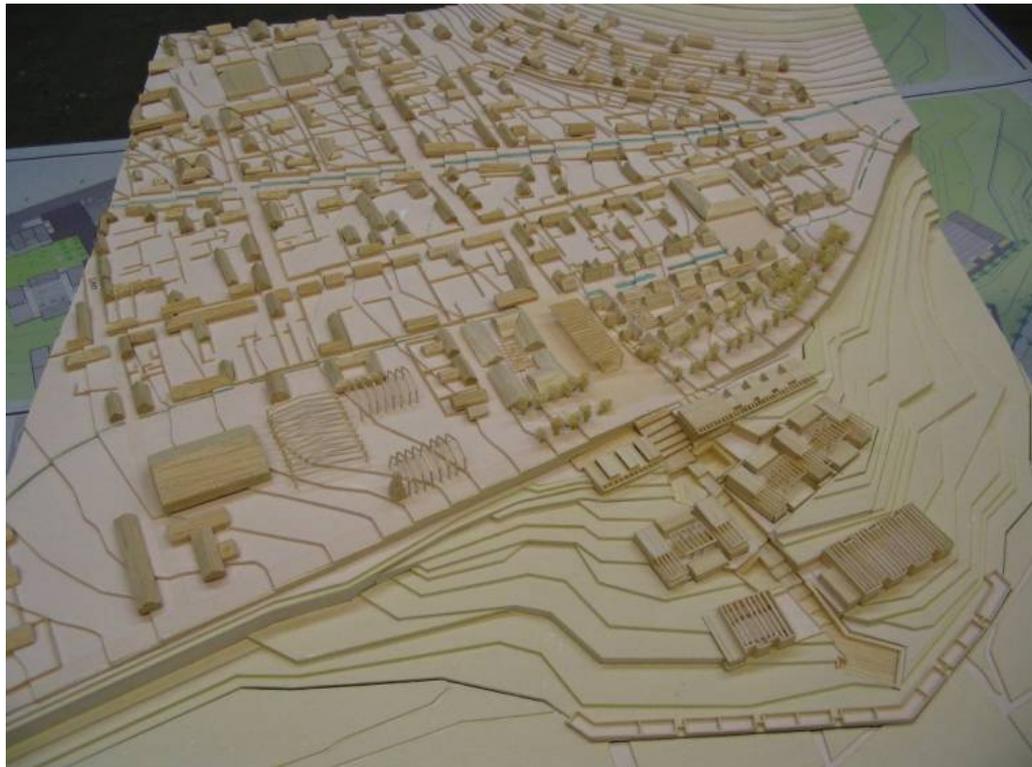
Los modelos se construyen estableciendo una relación de correspondencia con la realidad cuyas variantes pueden producir modelos de características diferentes. Se distinguen tres tipos:

- **MODELOS ICÓNICOS.** La relación de correspondencia se establece a través de las propiedades morfológicas: una maqueta es un modelo del objeto representado donde la relación establecida es una reducción de escala.
- **MODELOS ANÁLOGOS.** Poseen algunas propiedades similares a los objetos representados pero sin ser una réplica morfológica de los mismos: un mapa es un modelo de la realidad establecido mediante un conjunto de convenciones relativamente complejo que conduce a un resultado final claramente distinto del objeto representado.
- **MODELOS SIMBÓLICOS.** Se llega a un nivel superior de abstracción ya que el objeto real queda representado mediante una simbolización matemática (geométrica, estadística, etc.).

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1. Concepto de modelo

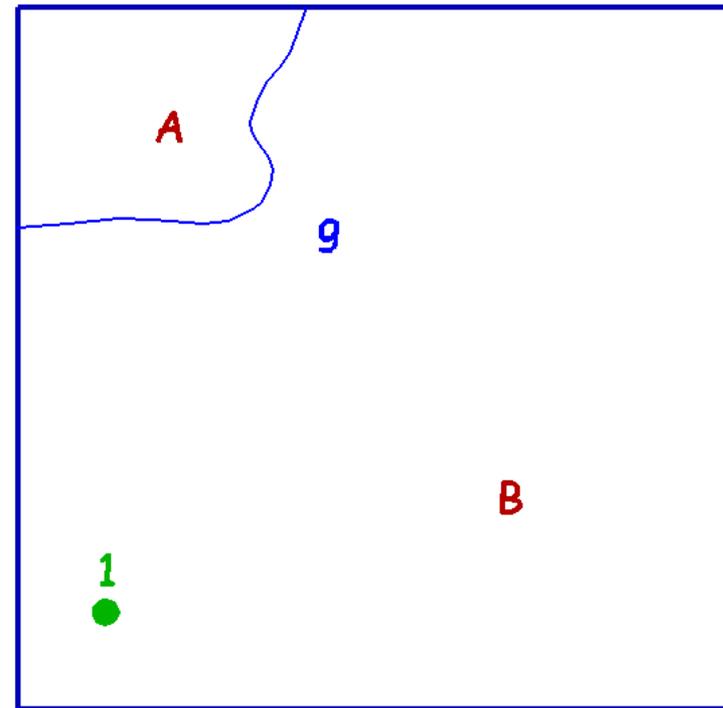
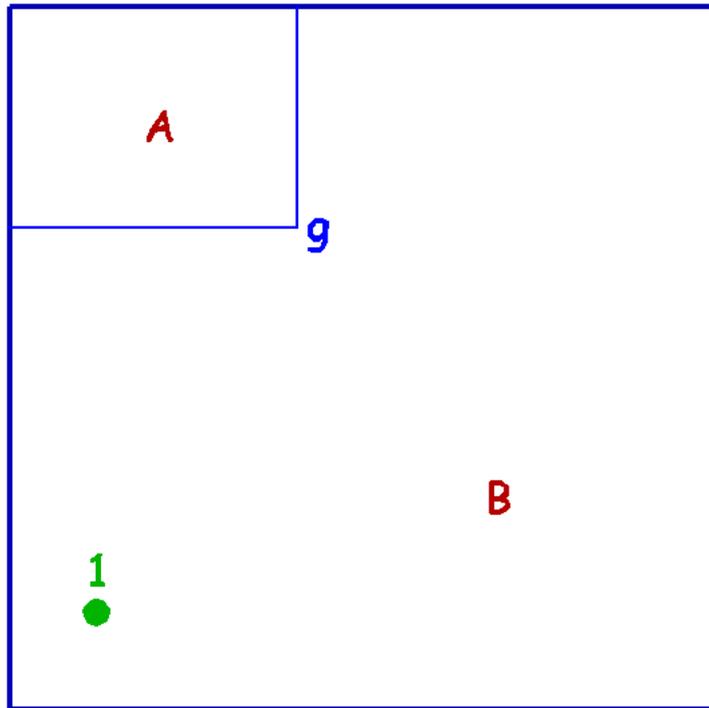
**MODELO ICÓNICO.-**



# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1. Concepto de modelo

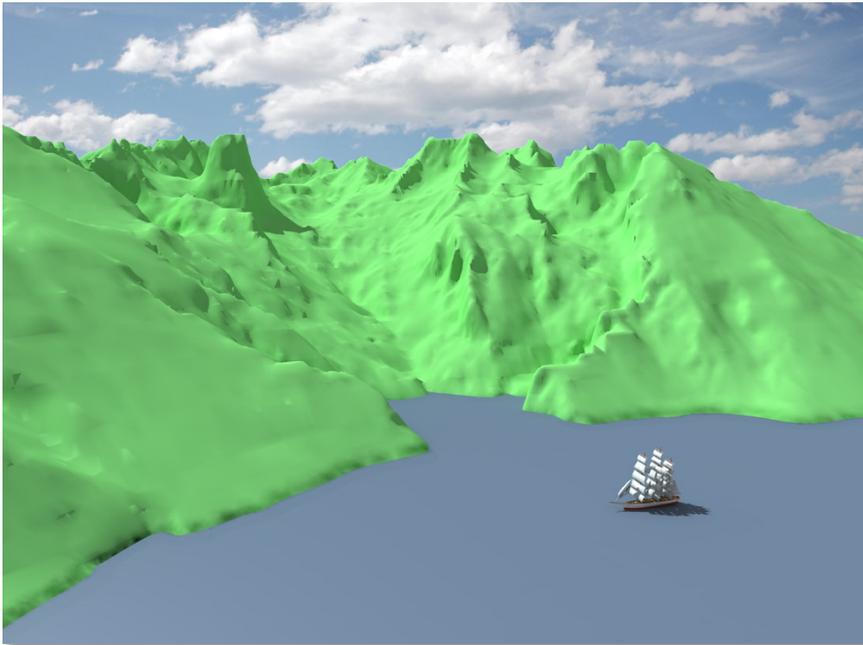
**MODELO ANÁLOGO.-**



# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1. Concepto de modelo

### MODELO SIMBÓLICO.-



# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1. Concepto de modelo

### SINGULARIDAD DE MODELOS.-

- En la actualidad existen técnicas e instrumental que permiten la adquisición de información de forma rápida, precisa y con costes mínimos, debiendo tener en cuenta que los métodos topográficos clásicos, por ejemplo, estaciones topográficas o GPS (tiempo real), láser escáner o métodos menos clásicos como son la fotogrametría, las técnicas lidar, teledetección, etc., consiguen capturar nubes de puntos muy grandes, en muy poco tiempo y con excelentes precisiones. La aparición de nuevas tecnologías ha alterado sustancialmente los métodos de trabajo, el cálculo e interpretación de los resultados, siendo éstos notablemente más satisfactorios.
- Hoy la problemática se centra más en la gestión del volumen de datos que se puede generar que en la propia captura de los datos de campo.

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.2. Modelos digitales del terreno

### DEFINICIÓN INICIAL DE MODELO DIGITAL DEL TERRENO.-

- Los modelos digitales del terreno (MDT) son una categoría de modelos simbólicos que ha nacido y se ha desarrollado al amparo de las nuevas tecnologías. Los modelos digitales del terreno se han definido como *“un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio”*.

### CONDICIONANTES DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.-

- Los MDT se caracterizan por ser digitales en vez de analógicos, lo que permite tratar estos modelos por medios informáticos.
- El hecho de que sean digitales requiere la codificación de la información que permita la posterior representación de nube de puntos, bien sea en forma de puntos, vectores, superficies, matrices, etc.

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.2. Modelos digitales del terreno

### CONDICIONANTES DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.-

- En los modelos debe existir una *estructura interna* que represente las relaciones espaciales entre los datos.
- En los modelos la variable representada debe ser *cuantitativa y de distribución continua*.

### MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.-

- Cuando en un MDT se representa la variable altitud se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE), aunque en realidad se pueden representar muchas otras propiedades del terreno.

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.2. Modelos digitales del terreno

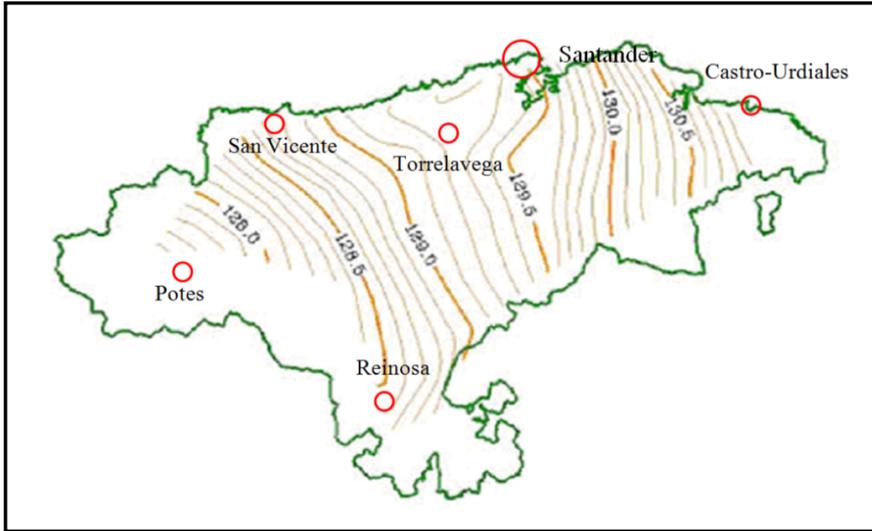
### DEFINICIÓN FINAL DE MODELO DIGITAL DEL TERRENO.-

- Con los condicionantes anteriores se deduce una definición final de MDT más completa y precisa que las anteriores: *“MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua”*.
- En la cartografía convencional la descripción hipsométrica constituye la infraestructura básica del resto de los mapas. El papel equivalente en los MDT lo desempeña el modelo digital de elevaciones (MDE), que describe la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados.

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

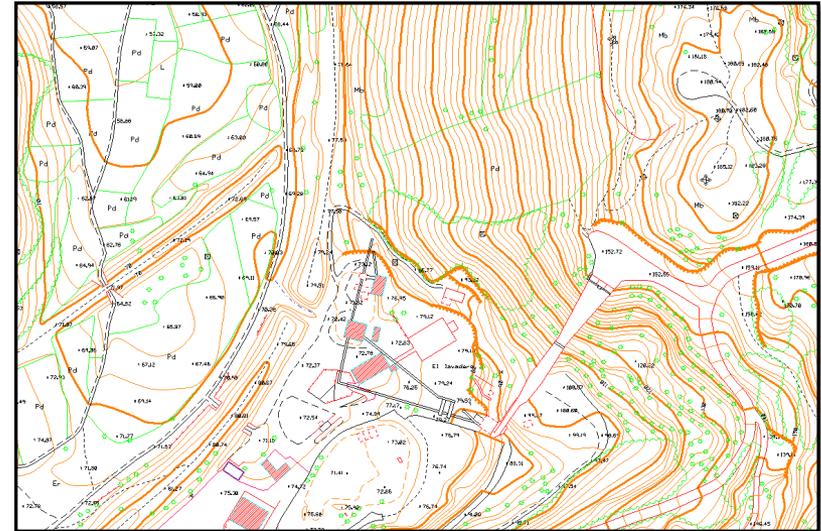
## 1.2. Modelos digitales del terreno

**MDT**



**Precipitaciones Mes de Enero 2012.**

**MDE**



**Altimetría en la zona de Cabárceno.**

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.3. Evolución histórica de los MDT

### ORIGEN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.-

- El término “*Digital Terrain Model*” tiene aparentemente su origen en el Laboratorio de Fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachusetts en la década de los años 50. En el trabajo pionero de Miller y Laflamme (1958) se establecen ya los primeros principios del uso de los modelos digitales para el tratamiento de problemas tecnológicos, científicos y militares.
- La definición del MDT que se menciona en sus trabajos es una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas (X, Y, Z) conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario.

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.3. Evolución histórica de los MDT

### ORIGEN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.-

- Probablemente el trabajo de mayor importancia fue desarrollado por el Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis que, en 1967, presentó el SYMAP, conjunto de programas de manejo de cartografía digital que incorporaba, entre otros, algoritmos de interpolación que permitían la generación de mapas de isolíneas a partir de puntos de altitud distribuidos irregularmente. SYMAP constituyó una de las primeras demostraciones de la posibilidad de manejo de la información espacial por medios informáticos.

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.3. Evolución histórica de los MDT

### ORIGEN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.-

- Synagraphic Mapping Technique (SYMAP), o Técnica Sinagráfica para elaboración de mapas. Desarrollado por investigadores de la Universidad de Harvard en 1964, era capaz de representar información espacial por medio de gráficos generados por ordenador.
- Mediante un conjunto de programas de ordenador que generaban mapas a partir de combinaciones de claves alfanuméricas con salida en impresoras de línea. Superponiendo las combinaciones de números y letras, se imprimían escalas de grises que representaban diversas coropletas o isopletas. Ciertamente, se trataba de algo muy rústico, pero rápidamente los sistemas de cartografía por ordenador evolucionaron hacia la complejidad actual.



# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.4. Modelos digitales y modelos analógicos

### ORIGEN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.-

- Las principales características que diferencian los MAT de los MDT en los aspectos prácticos del uso de la información, se expresan de forma resumida en la siguiente tabla.

PROPIEDAD	MAT	MDT
MANEJO	SENCILLO	COMPLEJO
ESTABILIDAD	BAJA	ALTA
TRANSPORTABILIDAD	BAJA	ALTA
ACTUALIZACIÓN	COMPLEJA	SENCILLA
TRATAMIENTO NUMÉRICO	DIFÍCIL	FÁCIL
SIMULACIÓN	NO	SI

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.5. Justificación y principios metodológicos

### IDEAS DE REFERENCIA.-

- La modelización del territorio es básica para el desarrollo de muchas profesiones técnicas, ya que las herramientas informáticas que generan MDT permiten al profesional realizar su trabajo, aumentar su productividad y eficiencia y lograr un trabajo de calidad en sus cálculos y en sus presentaciones.
- Estos programas, además de generar MDT, suelen resolver un gran número de operaciones de gran complejidad como: definición de ejes, rasantes, perfiles transversales y longitudinales, guitarras, cálculos de volúmenes, etc., aunque debe hacerse al menos una salvedad con el fin de acotar con máxima claridad el objetivo fundamental de los MDT que no es otro que representar el territorio de forma digital y para nada pretende marcar pautas con el objetivo de gestionar el territorio.

# 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

## 2.1. Introducción

### ESTRUCTURAS HABITUALES DE LOS MDT.-

- Las estructuras utilizadas para los modelos digitales del terreno han sido históricamente clasificadas en función de la representación de los datos, diferenciándose los modelos vectoriales y ráster. Las diferentes variantes dentro de estos dos grandes grupos se pueden observar en la tabla siguiente:

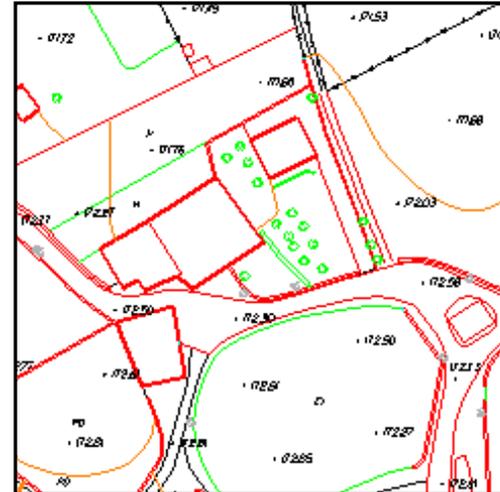
<b>MODELOS DIGITALES DEL TERRENO (MDT)</b>	<b>VECTORIALES</b>	CONTORNOS	
		TRIANGULOS (T.I.N.)	
	<b>RASTER</b>	MATRICES	Regulares
			Escalables
	POLIGONOS	Regulares	

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.2. Modelo vectorial

#### FUNDAMENTO DE LOS MODELOS VECTORIALES.-

- Representa el territorio mediante el uso de puntos de coordenadas relativas a un sistema referencial predeterminado. Con las coordenadas espaciales se gestionan los puntos, con dos puntos se gestionan las líneas y con una agrupación de líneas se forman los polígonos.



## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.2. Modelo vectorial

#### MODELOS DE CONTORNOS.-

- La estructura básica es el vector compuesto por un conjunto de pares de coordenadas (X, Y) que describe la trayectoria de líneas isométricas, que en este caso son curvas de nivel o isohipsas.
- Una curva de nivel queda definida, por lo tanto, mediante un vector ordenado de puntos que se sitúan sobre ella según ciertos intervalos. Es el sistema habitual de representación del terreno en cartografía y que suele ser la representación final que de modo convencional se proporciona en la mayoría de los trabajos cartográficos.



## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.2. Modelo vectorial

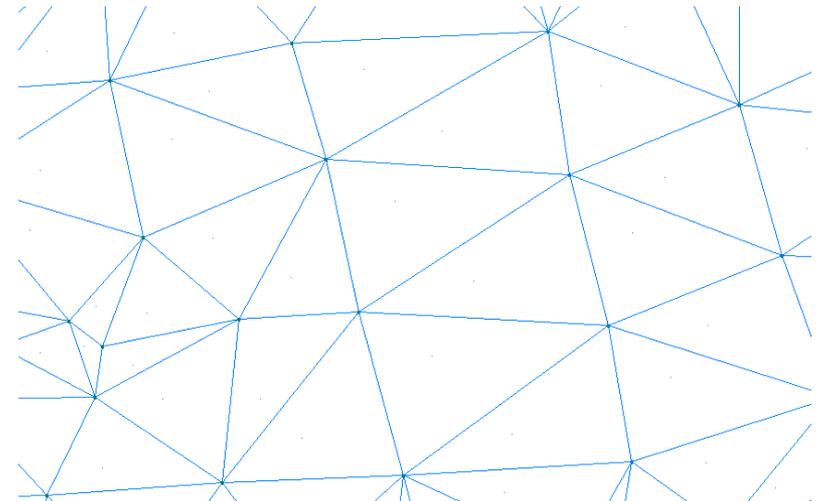
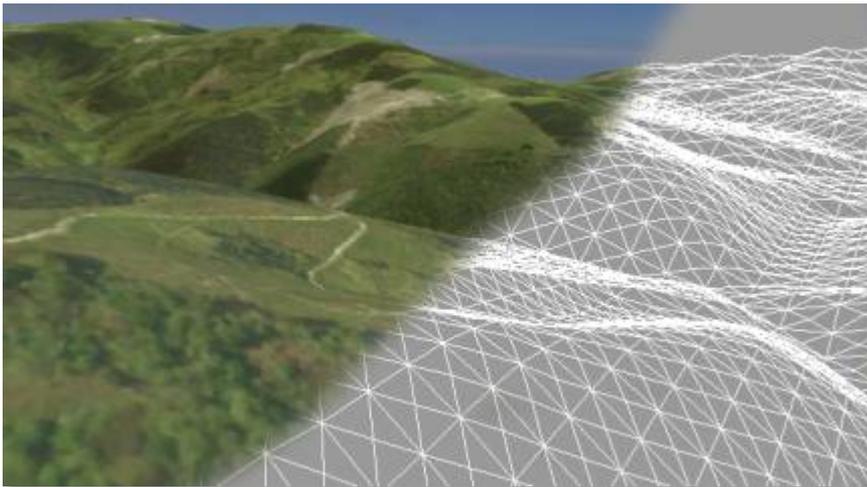
#### RED DE TRIÁNGULOS IRREGULARES (TIN).-

- Es una de las estructuras más utilizadas compuesta por una red de triángulos irregulares y que se suele identificar por las siglas de su denominación inglesa: *Triangulated Irregular Network* (TIN). Los triángulos quedan definidos a partir de tres puntos cercanos no colineales, que forman un plano. Por tanto, se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a una estructura anterior de puntos, constituyendo cada uno de los triángulos las denominadas facetas del modelo digital del terreno.
- La red de triángulos está internamente organizada en función de su vecindad mediante un conjunto de información bastante complejo que hace posible un manejo relativamente ágil y eficaz frente a alternativas menos estructuradas.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.2. Modelo vectorial

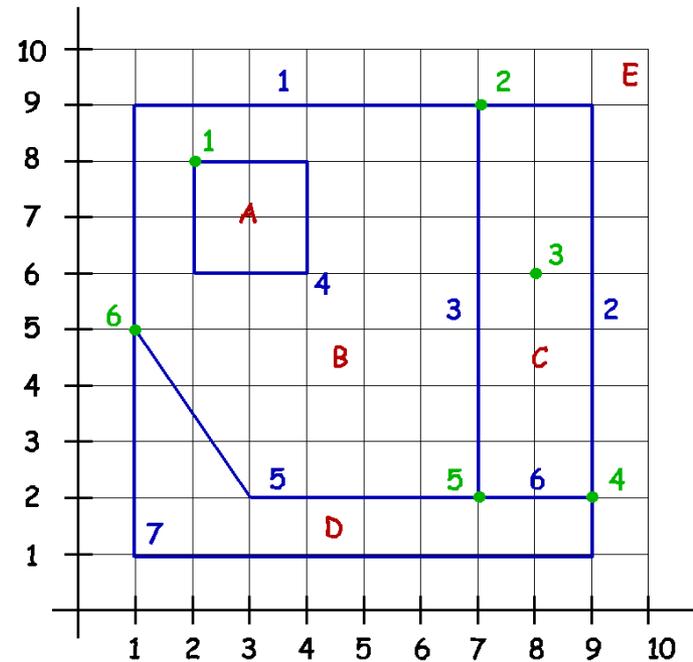
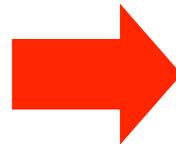
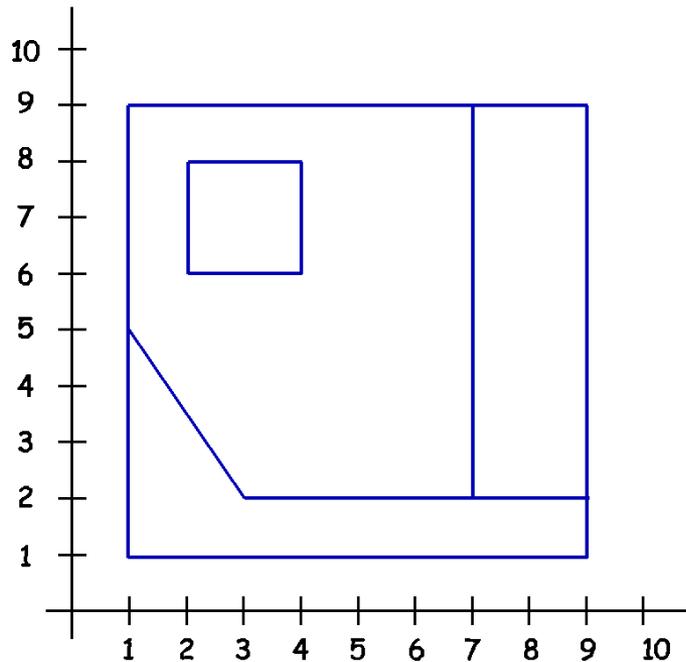
#### RED DE TRIÁNGULOS IRREGULARES (TIN).-



# 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

## 2.2. Modelo vectorial

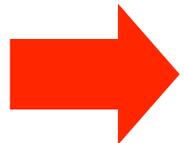
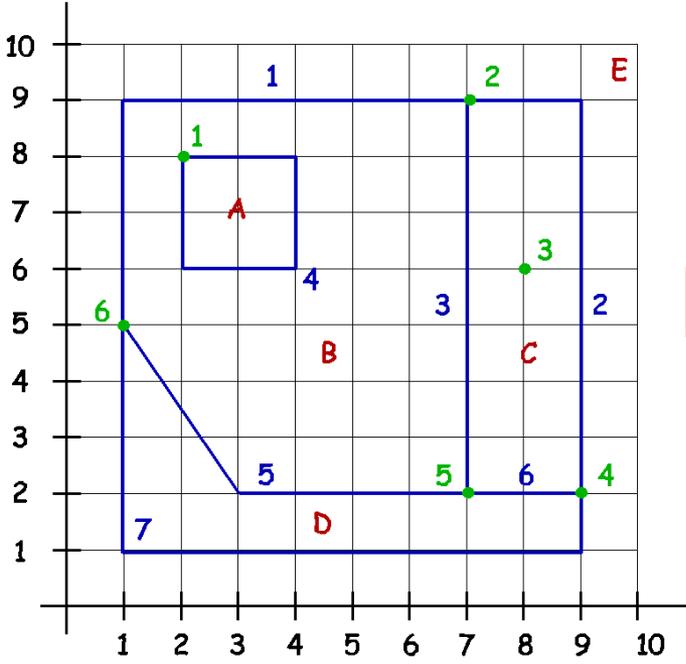
### ALMACENAMIENTO DE DATOS VECTORIALES.-



# 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

## 2.2. Modelo vectorial

### ALMACENAMIENTO DE DATOS VECTORIALES.-

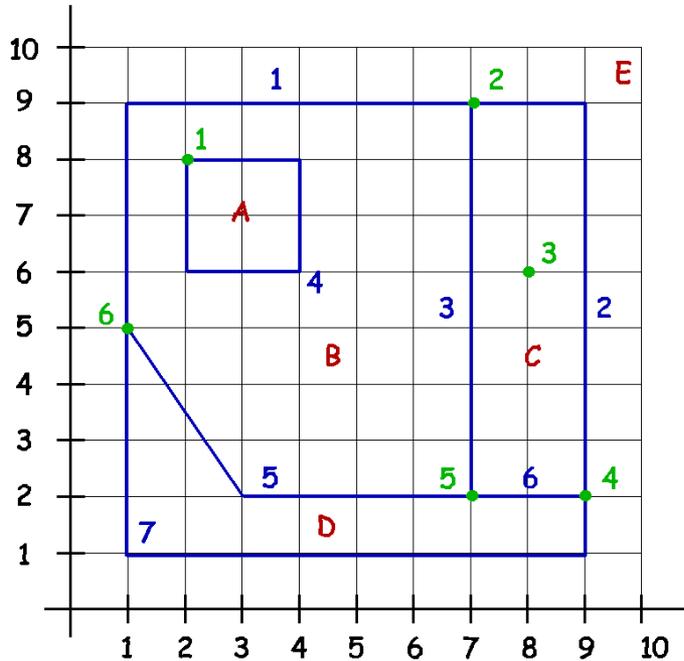


TOPOLOGÍA DE POLÍGONOS	
POLÍGONOS	ARCOS
A	4
B	1,3,5,-4
C	2,3,6
D	5,6,7
E	Exterior

# 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

## 2.2. Modelo vectorial

### ALMACENAMIENTO DE DATOS VECTORIALES.-



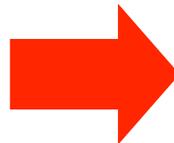
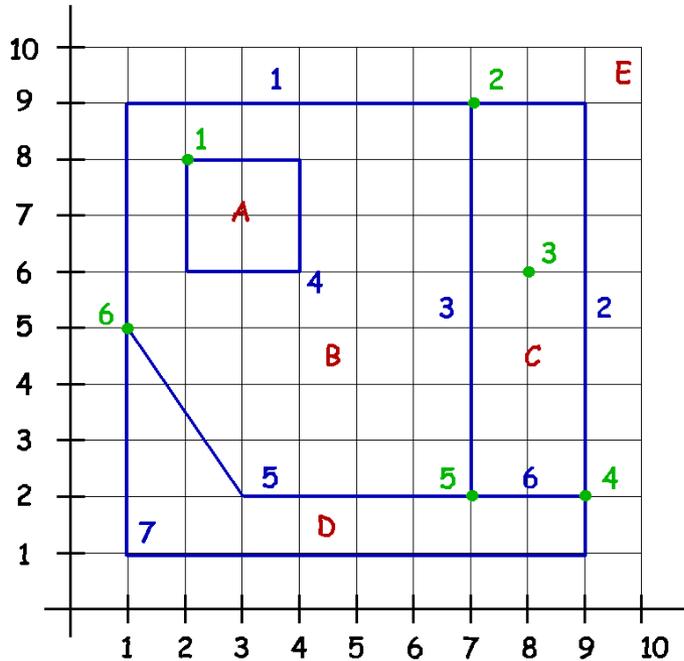
TOPOLOGÍA DE NODOS	
NODOS	ARCOS
1	4
2	1,2,3
3	
4	2,6,7
5	3,5,6
6	1,5,7

NODO	CARA
3	C

# 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

## 2.2. Modelo vectorial

### ALMACENAMIENTO DE DATOS VECTORIALES.-

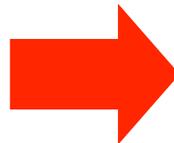
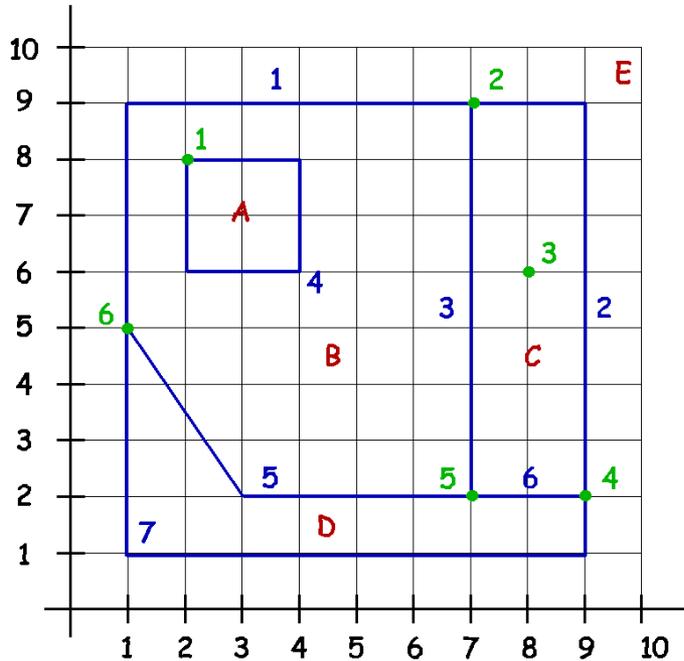


TOPOLOGÍA DE ARCOS				
ARCO	NODO ORIGEN	NODO FINAL	POLIG. IZQDA.	POLIG. DCHA.
1	6	2	E	B
2	2	4	E	C
3	2	5	C	B
4	1	1	B	A
5	5	6	D	B
6	4	5	D	C
7	4	6	E	D

# 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

## 2.2. Modelo vectorial

### ALMACENAMIENTO DE DATOS VECTORIALES.-



COORDENADAS DE LOS ARCOS			
ARCO	NODO ORIGEN	NODOS INTERMEDIOS	NODO FINAL
1	1,5	1,9	7,9
2	7,9	9,9	9,2
3	7,9	--	7,2
4	2,8	(4,8) (4,6) (2,6)	2,8
5	7,2	3,2	1,5
6	9,2	--	7,2
7	9,2	(9,1) (1,1)	1,5

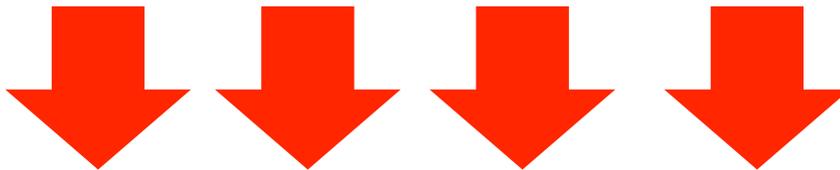
## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.2. Modelo vectorial

#### ALMACENAMIENTO DE DATOS VECTORIALES.-

- **VENTAJAS DE LA TOPOLOGÍA:**

- Asegura que en una posición existe únicamente un elemento.
- Las líneas se cruzan en nodos.
- Los polígonos rellenan el espacio, exhaustivamente.
- Los límites comunes se almacenan una sola vez.



- Permite establecer las **RELACIONES TOPOLÓGICAS**.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

#### FUNDAMENTOS DE LOS MODELOS RÁSTER O TESELARES.-

- Representa el espacio mediante una serie de elementos discretos por medio de una retícula, cada una de esas celdas se considera como indivisible y es identificada por su número de fila y columna. La información temática de cada celda es única y se asigna respecto de un valor relativo a la variable que está representando.

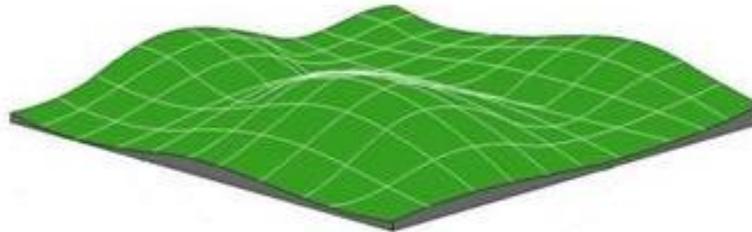


## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

#### MATRICES REGULARES.-

- Son el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altura media de cada celda, entendiendo como tal el elemento de menor superficie que forma la retícula. Habitualmente se utiliza un valor puntual asociado a cada nudo de la retícula o al punto medio de la celda.
- La retícula puede adoptar diferentes formas, pero se suele utilizar una malla regular cuadrada con filas y columnas espaciadas en igual magnitud, obteniéndose una resolución constante en todo el modelo.



## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

#### MATRICES RESOLUCIÓN VARIABLE.-

- El interés de las matrices de resolución variable reside en la posibilidad de solucionar el principal problema de las matrices regulares (su resolución espacial prefijada), manteniendo, en principio, sus principales ventajas: la sencillez conceptual y operacional. En este tipo de matrices los elementos pueden ser bien datos elementales (como en las matrices regulares), bien submatrices con un nivel de resolución diferente. La estructura final es un árbol jerárquico y dinámico de submatrices con una profundidad en principio arbitraria y cuya resolución espacial se duplica en cada nivel. Se trata de una estructura análoga a los quadtrees, utilizados ocasionalmente en el tratamiento de variables estructuradas.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

#### ALMACENAMIENTO DE DATOS RÁSTER.-

#### ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO SIMPLE.-

#### ENUMERACIÓN EXHAUSTIVA.-

- Se trata de almacenar uno por uno el valor de cada celda, de acuerdo con la secuencia que se establezca, generalmente fila a fila a partir de la celda superior izquierda.

1, 1, 2, 2, 2, 4, 4, 3, 1, 2, 2, 2, 2, 4, 4, 3, 1, 2, 2,  
 2, 4, 4, 3, 3, 2, 2, 2, 4, 4, 3, 3, 3, 2, 2, 4, 4, 4, 3,  
 3, 3, 2, 4, 4, 4, 3, 3, 3, 1, 4, 4, 3, 3, 3, 3, 1, 1, 4,  
 3, 3, 3, 3, 1, 1, 1

1	1	2	2	2	4	4	3
1	2	2	2	2	4	4	3
1	2	2	2	4	4	3	3
2	2	2	4	4	3	3	3
2	2	4	4	4	3	3	3
2	4	4	4	3	3	3	1
4	4	3	3	3	3	1	1
4	3	3	3	3	1	1	1

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

#### ALMACENAMIENTO DE DATOS RÁSTER.-

#### ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO SIMPLE.-

##### RUN LENGTH ENCODING.-

- En este caso la codificación no se hace valor a valor, sino por grupos de valores seguidos.
- **AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL.** Cuando se muestra una tendencia a que las cosas cercanas sean más similares que las más lejanas, es decir, un mismo valor tiende a aparecer cubriendo amplios espacios.
- En los casos que la autocorrelación espacial de los datos sea alta, el procedimiento es muy eficaz.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

#### ALMACENAMIENTO DE DATOS RÁSTER.-

#### ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO SIMPLE.-

##### RUN LENGTH ENCODING.-

- **Este procedimiento tiene dos modalidades:**
  - Estándar:                    número y Valor.
  - Punto de valor:        valor y Posición.
  
- **Además tiene varios órdenes de almacenamiento:**
  - Convencional (Row).
  - Orden en greca (Row-prime).
  - N de Morton.
  - Peano-Hilbert.
  - Diagonal de Cantor.
  - Espiral.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

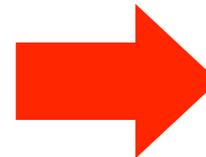
#### ALMACENAMIENTO DE DATOS RÁSTER.-

#### ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO SIMPLE.-

#### RUN LENGTH ENCODING.-

- **PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR:** número y valor.

1	1	2	2	2	4	4	3
1	2	2	2	2	4	4	3
1	2	2	2	4	4	3	3
2	2	2	4	4	3	3	3
2	2	4	4	4	3	3	3
2	4	4	4	3	3	3	1
4	4	3	3	3	3	1	1
4	3	3	3	3	1	1	1



2, 1      3, 3  
 3, 2      2, 2  
 2, 4      3, 4  
 1, 3      3, 3  
 1, 1      1, 2  
 4, 2      3, 4  
 2, 4      3, 3  
 1, 3      1, 1  
 1, 1      2, 4  
 3, 2      4, 3  
 2, 4      2, 1  
 2, 3      1, 4  
 3, 2      4, 3  
 2, 4      3, 1

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

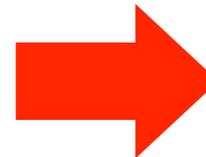
#### ALMACENAMIENTO DE DATOS RÁSTER.-

#### ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO SIMPLE.-

#### RUN LENGTH ENCODING.-

- **PROCEDIMIENTO PUNTO VALOR:** valor y posición.

1	1	2	2	2	4	4	3
1	2	2	2	2	4	4	3
1	2	2	2	4	4	3	3
2	2	2	4	4	3	3	3
2	2	4	4	4	3	3	3
2	4	4	4	3	3	3	1
4	4	3	3	3	3	1	1
4	3	3	3	3	1	1	1



1, 2	3, 32
2, 5	2, 34
4, 7	4, 37
3, 8	3, 40
1, 9	2, 41
2, 13	4, 44
4, 15	3, 47
3, 16	1, 48
1, 17	4, 50
2, 20	3, 54
4, 22	1, 56
3, 24	4, 57
2, 27	3, 61
4, 29	1, 64

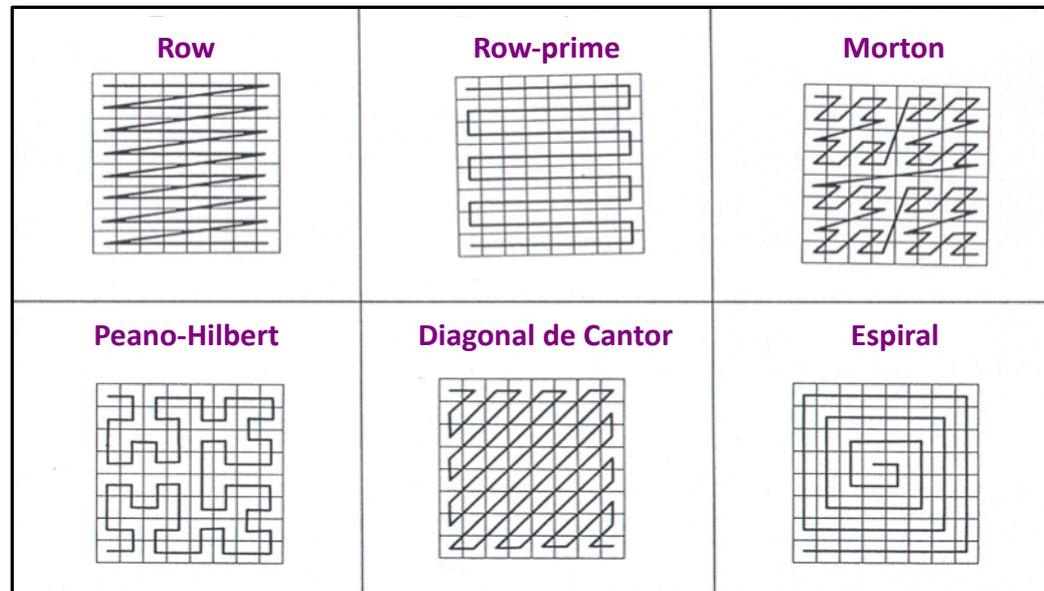
## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

**ALMACENAMIENTO DE DATOS RÁSTER.-**

**ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO SIMPLE.-**

**RUN LENGTH ENCODING.-**



## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

#### ALMACENAMIENTO DE DATOS RÁSTER.-

#### ESTRUCTURAS CUADTREE.-

- Se trata de operar en una misma capa con distintos tamaños de bloques o grupos de celdas, lo que en la práctica significa trabajar con una resolución variable.
- Los bloques son más pequeños allí donde se requiere un mayor nivel de detalle (variación espacial de los datos grande) y los bloques son más grandes donde la variación espacial de los datos es pequeña.
- Es una forma de ordenar la malla de celdas para optimizar el acceso a los valores temáticos.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

#### ALMACENAMIENTO DE DATOS RÁSTER.-

#### ESTRUCTURAS CUADTREE.-

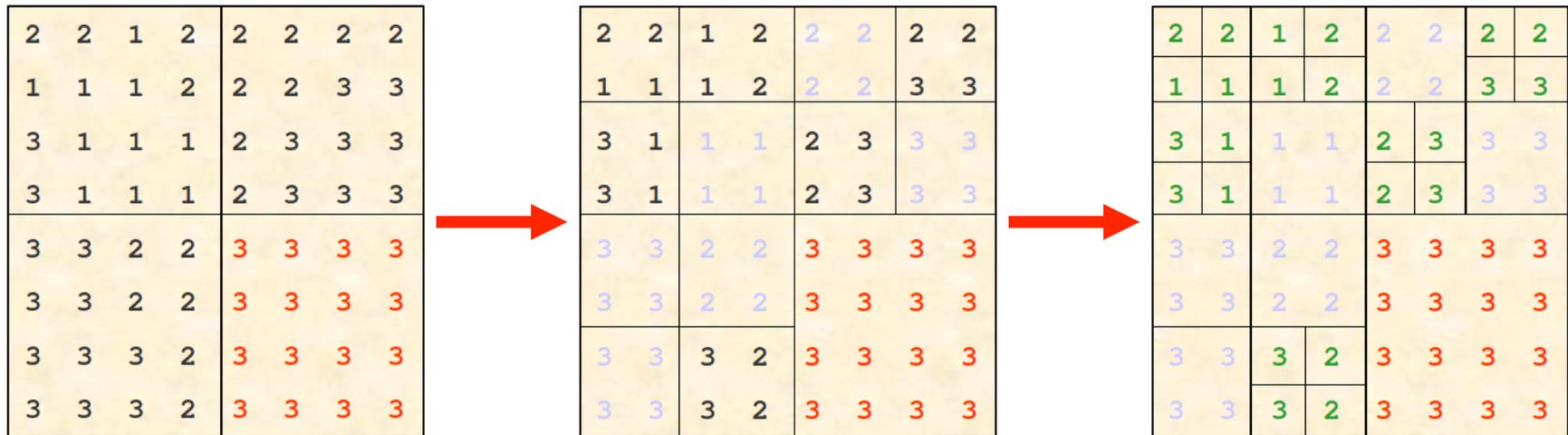
- **PROCEDIMIENTO PUNTO VALOR.** El sistema más difundido para identificar los cuadrantes de distinto rango jerárquico es el NÚMERO MATRICIAL DE MORTON.
- Los cuatro cuadrantes iniciales del mapa llevan los números 0, 1, 2 y 3. Sobre este primer dígito se van añadiendo nuevos dígitos a medida que cada cuadrante se subdivide en nuevos cuadrantes.
- El resultado es una típica estructura arborescente en la que cada rama se subdivide en otras cuatro, de ahí que se utilice el término cuaternario o quadtree.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

**ALMACENAMIENTO DE DATOS RÁSTER.-**

**ESTRUCTURAS CUADTREE.-**



**Número matricial de morton.**

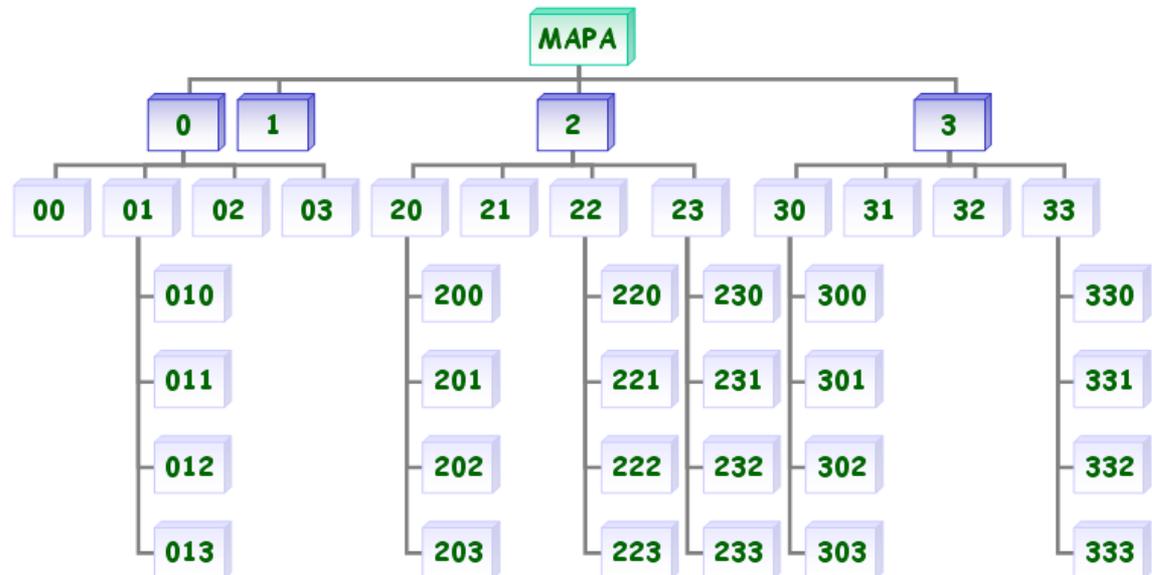
## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.3. Modelo Ráster o Teselar

**ALMACENAMIENTO DE DATOS RÁSTER.-**

**ESTRUCTURAS CUADTREE.-**

222	223	232	233	32	332	333
220	221	230	231		330	331
202	203	21	302	303	31	
200	201		300	301		
02		03		1		
00	012	013				
	010	011				



**Número matricial de morton.**

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.4. Otras estructuras

#### OTRAS ESTRUCTURAS.-

- Se han descrito muchas variantes y alternativas para el archivo y tratamiento de los MDE. La representación mediante perfiles suele citarse como una posibilidad y algunos autores la evalúan positivamente debido a algunas ventajas teóricas.
- La codificación de contornos mediante ecuaciones polinómicas se propuso en los primeros trabajos sobre modelos digitales; más recientemente, se han propuesto métodos similares basados en una secuencia de segmentos de Bézier con el fin de reducir el tamaño de los ficheros vectoriales.
- Otros, como los polígonos irregulares adosados o redes regulares hexagonales, aducen en cada caso ventajas para aplicaciones concretas, pero su uso no se ha generalizado hasta el momento.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.5. Criterios de selección de estructuras

#### PAUTAS GENERALES.-

- La estructura matricial ofrece una representación adecuada de la forma general de la superficie en áreas de fuerte relieve, pero arroja peores resultados en la definición de detalles en áreas de relieve suave.
- La representación vectorial de contornos y la de redes irregulares de triángulos tienen a su favor la posibilidad de aumentar el grado de detalle en zonas concretas donde las pequeñas variaciones del relieve pueden no ser detectables con una estructura matricial.
- En general, la descripción vectorial es más adecuada para variables discretas, que por su naturaleza están limitadas por fronteras lineales claras, mientras que las descripciones ráster se adaptan mejor para la representación espacial de variables continuas, con fronteras lineales menos claras.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.5. Criterios de selección de estructuras

#### PAUTAS GENERALES.-

- La necesidad de archivar grandes volúmenes de datos supuso una seria dificultad hasta hace pocos años debido a la escasa capacidad de almacenamiento de los ordenadores y al elevado tiempo de acceso de las memorias masivas. En principio, el modelo vectorial es menos exigente que el matricial, lo que supone una ventaja.
- La tendencia actual en los MDT es la adopción de estructuras vectoriales para el tratamiento de la información, ésta se refiere esencialmente a propiedades cualitativas del terreno, de distribución discreta y con límites netos entre las diferentes clases.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS MDT

### 2.6. Rasterización y Vectorización

#### FUNDAMENTO GENERAL.-

- Habiendo elegido una estructura ráster o vectorial, en cualquier caso, es posible generar un modelo matricial a partir de uno vectorial y viceversa, constituyendo básicamente un problema de interpolación en el entorno de cada uno de los puntos definidos por la intersección de filas y columnas.
- Este proceso se denomina rasterización o vectorización dependiendo del flujo de cambio de ráster a vector y supone una pérdida de información ligada a la transformación, debiendo ser mínima o al menos asumible y dentro de la tolerancia exigida.

**EN LA RED EXISTEN INFINIDAD DE RASTERIZADORES Y VECTORIZADORES**

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### INTRODUCCIÓN.-

- La captación de la información altimétrica constituye el paso inicial en el proceso de construcción del MDE, e incluye la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos manipulable por medios informáticos.
- Esta fase inicial es la más costosa (en términos de tiempo y trabajo) de todo el proceso de manejo de los MDE. Por añadidura, se trata de la fase de mayor transcendencia ya que la calidad de su resultado es el principal factor limitante para todos los tratamientos que se realicen posteriormente.
- Tras la captación de los datos, éstos deben ser estructurados de forma adecuada para el manejo por parte de las aplicaciones informáticas, lo cual puede realizarse de formas variadas, aún dentro del mismo esquema general (matricial, vectorial, etc.).

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### FUNDAMENTOS.-

- Se consideran métodos directos en la captura de la información a todos aquéllos que requieren la interacción y, por tanto, el contacto directo con el territorio que se pretende levantar, todo ello con el objetivo de obtener la nube de puntos (X, Y, Z) característica del propio territorio.
- Entre los métodos que se han acabado imponiendo en esta disciplina se encuentran el GPS (siglas de su denominación en Inglés: global positioning system) y métodos topográficos clásicos, con la estación topográfica como instrumento más empleado actualmente.

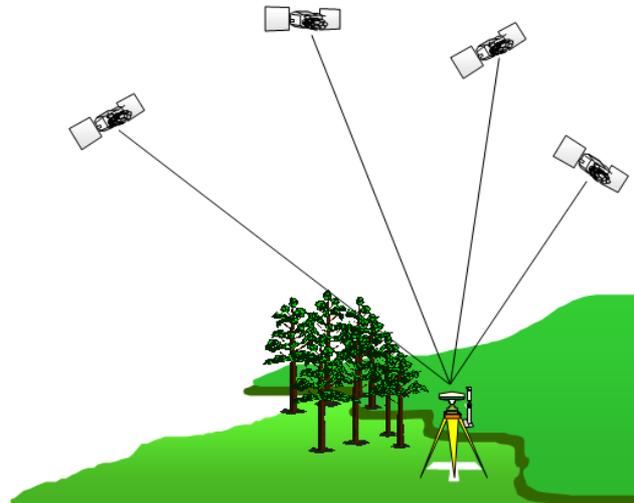
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### GEODESIA ESPACIAL.-

- Técnica que permite el posicionamiento de puntos en la superficie terrestre, basándose en la observación de señales, formadas por radiaciones electromagnéticas procedentes de satélites artificiales o naturales.



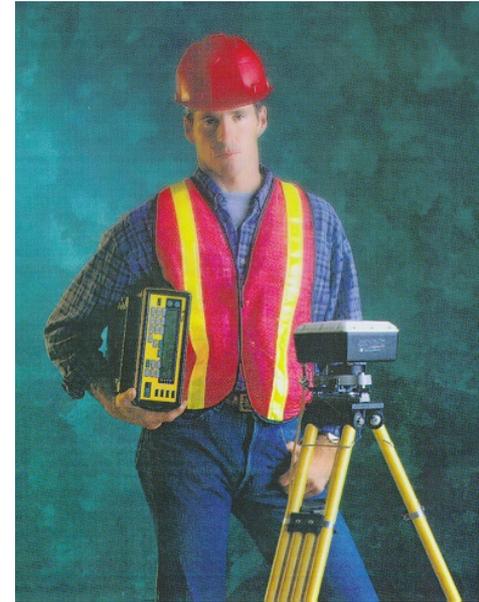
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-



Equipo clásico.



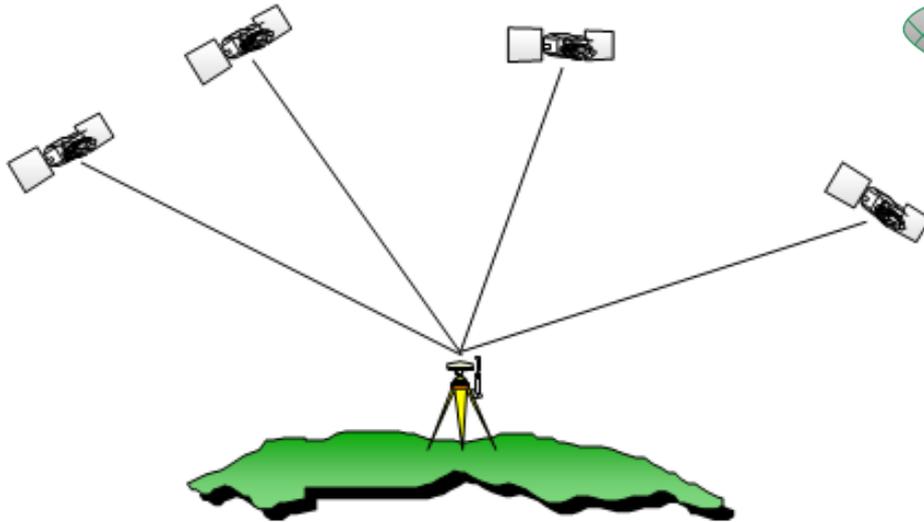
Equipo GPS.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

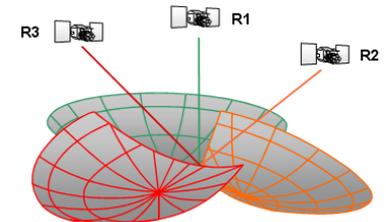
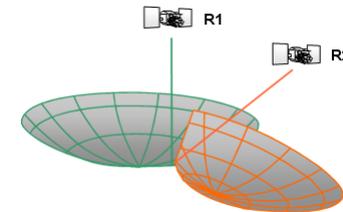
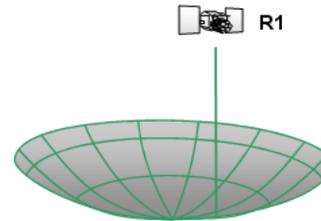
### 3.1. Métodos directos

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

FUNDAMENTO ELEMENTAL.-



4 incógnitas a resolver: latitud, longitud, altura y tiempo.  
Es muy similar a un problema de trisección inversa.



# 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

## 3.1. Métodos directos

### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

### FUNDAMENTO ELEMENTAL.-

### POSICIONAMIENTO DE SATÉLITES.-

- Para conseguir el posicionamiento de un punto sobre la superficie terrestre es necesario conocer la posición de los satélites:
- **EFEMÉRIDES:** las efemérides contienen las coordenadas de los satélites, dadas en sistema geocéntrico global WGS-84. y el error del oscilador de cada satélite.

```

/* ORBIT FOR DAY 322, 1997
* INCLUDING PRECISE CODE CLOCKS (SMOOTHED CODE)
* 1997 11 18 10 0 0.00000000
1 -19017.204314 11205.286270 -14641.466306 32.873218
2 17933.834969 2020.953695 -19245.567473 -424.575142
3 13269.414177 25063.272233 377.706560 72.213630
4 24078.589581 -6110.690876 9696.431198 57.346656
5 -10264.027449 -23953.067381 -5232.362049 122.939520
6 -12109.128470 -9494.318370 21751.627580 -0.050710
7 18417.940070 -10069.786827 -15854.320970 760.731521
9 -6664.913984 -15110.928922 -20916.708944 -18.825157
10 4380.994433 -18320.531586 18699.984396 15.196873
13 18748.104831 -9791.944371 16141.023453 -23.319676
14 12083.012560 23609.509254 -262.845381 24.172842
15 8002.805775 14511.592691 -20974.288264 4911.111081
16 17028.006883 17687.532772 10266.349825 36.702585
17 -24651.065522 -7237.480598 7330.590592 -165.239668
18 12701.177785 8975.527694 21299.167913 7.465391
19 23359.772497 6927.122613 10784.917777 309.341500
21 -16810.311598 -649.085456 -20592.597039 5.765568
22 -7957.239504 15091.241745 20157.546421 29.972118
23 -17917.794257 -13791.492428 -13829.858867 6.177377
24 12370.643199 -12888.148628 19858.701102 785.625702
25 22910.212891 8401.714201 10239.827435 -6.489865
26 3971.337164 -23175.460720 -11798.921702 -41.527662
27 26788.547839 -1716.109771 -1594.506575 8.060522
29 -12325.750230 23449.043942 787.726787 169.973773
30 17510.264968 -17940.388171 8596.348986 -10.725969
31 -3118.442627 23188.797882 -12464.193322 0.065937
1997 11 18 10 15 0.00000000
1 -18290.513368 9536.864890 -16602.506578 32.775708
2 19062.900110 3905.790366 -17901.477172 -424.690299
3 -13417.183726 22751.523207 31991.847290 72.289175
4 25019.469120 -5939.517702 7034.559373 57.652584
5 -9607.991506 -23480.294282 -7915.443969 122.904635
6 -10866.225143 -11600.617046 21356.827466 -0.102785
7 17668.513907 -8239.923851 -17662.172165 760.785682
9 -4257.257812 -15243.266730 -21416.084623 -18.759779
10 5649.264202 -16502.487270 20017.479159 15.165100
13 17975.107456 -8007.455875 17910.351013 -23.529104
14 11785.210739 23554.920265 -3133.075003 24.199906
15 5609.431501 114504.396387 21751.274187 4911.114675
16 17340.600628 18683.433140 7657.323235 36.706857
17 -23644.528086 -7330.106931 9975.314400 -165.231974
18 11567.132483 11169.531716 20905.039486 7.368727
19 22023.089577 7316.600970 13082.964977 309.298600
21 -17953.809908 -2644.212468 -19500.946256 5.740802
22 -9363.736121 13163.769956 20930.532775 29.783349
23 -18488.819290 -15178.409212 -11513.381102 6.000300
24 14510.751951 -12818.924198 18371.690521 785.474822
25 23953.084395 8163.364438 76765.954899 -6.453787
26 4792.707072 -24133.736845 -9289.853236 -41.603687
27 26823.236242 -1453.371864 1186.861754 7.848160
29 -12536.933186 23239.266923 -2060.047613 170.072807
30 -17732.782092 -1806.103613 -5925.834075 -10.664890
31 -3917.995941 24206.96198 -10007.464557 -0.059358
1997 11 18 10 30 0.00000000
1 -17558.279148 7647.763371 -18275.204930 32.829345
2 20175.787431 5591.933984 -16245.122869 -424.544483
3 13452.041549 22159.604931 5965.877297 72.371092
4 25662.264195 -5796.772418 4252.966127 57.443073
5 -8752.503960 -22803.990961 -10462.531607 122.849109
6 -9761.438262 -13712.650698 20597.122336 -0.171706
7 16936.117705 -6200.215817 -19157.222612 760.660710
9 1820.672902 -15498.992893 21549.817971 -18.660206
10 7085.744226 -14648.588459 20990.165612 15.258125
13 17219.339135 -6019.722201 19373.138583 -23.428079
14 11310.232460 23244.898522 -5949.164074 24.068365
15 3153.472477 14633.403551 -22161.424104 4911.118969
16 17543.778251 19405.869495 4917.522482 36.670592
17 -22354.132551 -7480.722454 12450.799369 -165.252754
18 10567.181140 13355.317909 20143.541450 7.471024
19 20462.654875 7803.024904 15158.592934 309.174238
21 -19118.027601 -4453.934853 -18076.657209 5.552138
22 -10899.053313 11256.352835 21338.439027 29.835335
23 -18985.114638 -16298.596840 -8998.437457 6.040079
24 16468.979853 -12856.576337 16573.158927 785.566483
25 -24711.421401 7936.005559 -4980.239164 -6.576336
26 5438.660795 -24863.984959 -6616.128932 -41.714856
27 26564.465628 -1158.019175 3948.534585 8.003213
29 -12630.395458 22745.626777 -4872.049967 169.917050
30 -17820.938782 -19406.720207 3152.835022 -10.607304
31 -4547.094608 25002.503696 -7377.062822 -0.056096
EOF

```

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

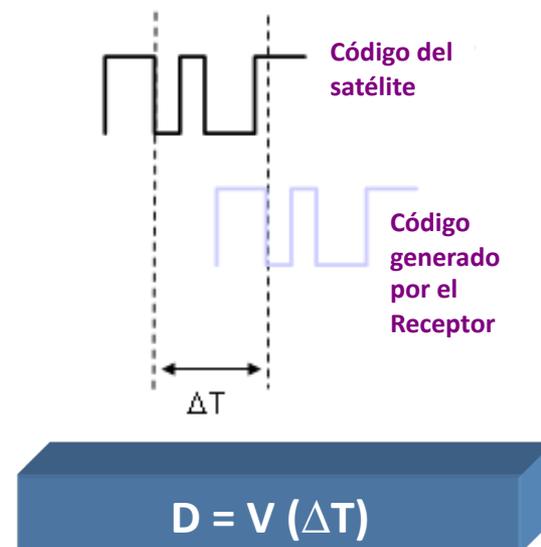
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### FUNDAMENTO ELEMENTAL.-

#### DETERMINACIÓN PSEUDODISTANCIA MEDIANTE CÓDIGO.-

- Cada satélite envía una única señal que se repite cada aprox. 1 msec.
- El receptor compara la señal recibida con la generada por el mismo.
- El desfase de tiempo ( $\Delta T$ ) nos permite determinar la distancia.
- El reloj del Receptor tiene que sincronizar con el reloj del satélite.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

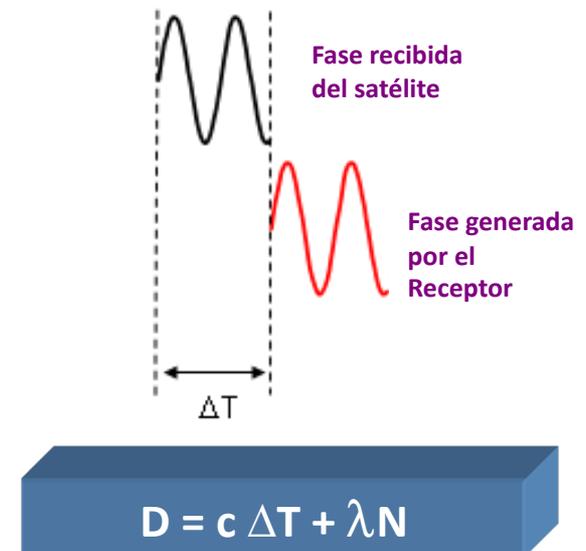
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### FUNDAMENTO ELEMENTAL.-

#### DETERMINACIÓN DISTANCIA MEDIANTE FASE.-

- La longitud de onda es de 19 cm en L1 y 24 cm en L2.
- El Receptor compara la señal de fase por él generada con la recibida.
- El número entero de longitudes de onda durante la recepción es desconocida (Ambigüedades).



# 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

## 3.1. Métodos directos

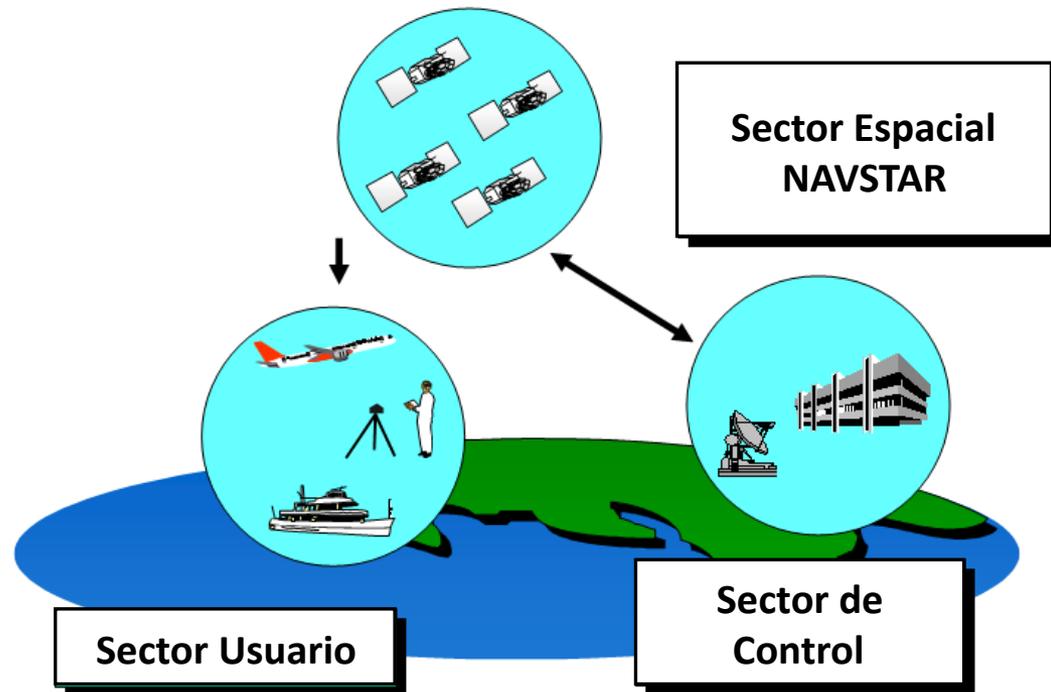
**SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-**

**CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA.-**

**SECTOR ESPACIAL**

**SECTOR CONTROL**

**SECTOR USUARIO**



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA.-

##### SECTOR ESPACIAL.-

- **Está conformado por la constelación de satélites NAVSTAR:**
  - Al principio se pensó que sólo eran necesarios 18 satélites (más 3 de emergencia por si acaso fallaba alguno. Sin embargo más tarde se comprobó que con este número la cobertura en algunos puntos de la superficie terrestre no era buena.
  - Así pues se pasaron a utilizar 21 satélites (más 3 de reserva) repartidos en 6 órbitas, de forma que hay 4 satélites por órbita.
  - El sistema está diseñado de tal forma que sobre cualquier punto de la superficie terrestre se ven al menos 4 satélites.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

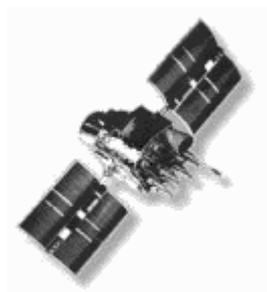
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA.-

#### SECTOR ESPACIAL.-

- Se planificaron cuatro familias de satélites:



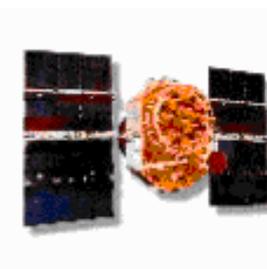
#### BLOQUE I

- 400 Kg de peso.
- 400 W potencia.
- 4 días sin control.



#### BLOQUE II

- 800 Kg de peso.
- 700 W potencia.
- 20 días sin control.



#### BLOQUE IIA

- 930 Kg de peso.
- 700 W potencia.
- 180 días sin control.



#### BLOQUE IIR

- 930 Kg de peso.
- 700 W potencia.
- 180 días sin control.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

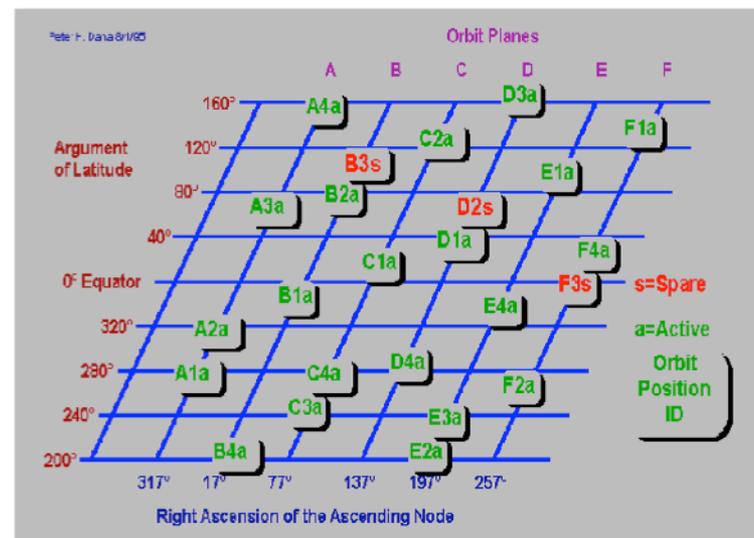
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA.-

##### SECTOR ESPACIAL.-

- Las órbitas de los satélites son casi circulares, con una excentricidad de 0,03 a 0,3.
- Están situadas a una altura de 20180 km.
- Tienen una inclinación respecto al plano del ecuador de 55°.
- La separación entre las órbitas es de 60°.
- El período de los satélites es de 11h 58m.



Simplified Representation of Nominal GPS Constellation.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

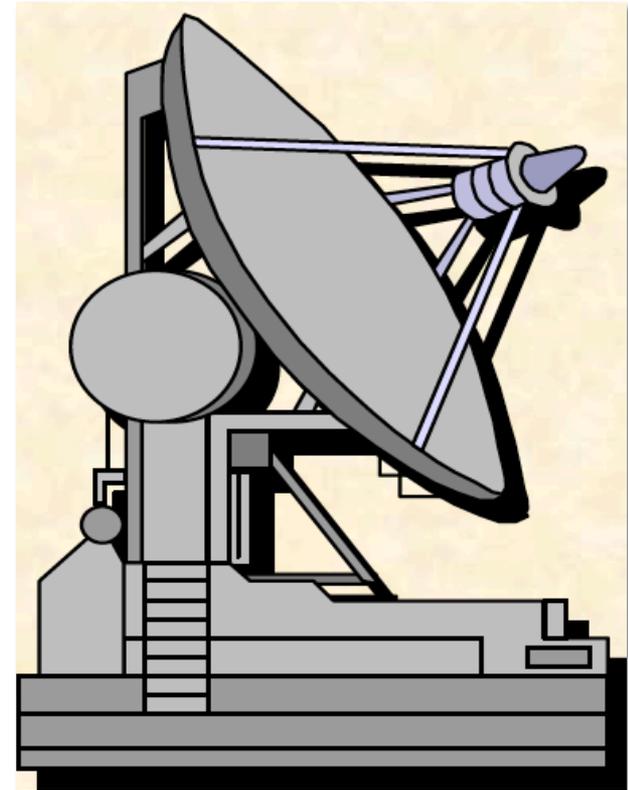
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA.-

#### SECTOR CONTROL.-

- Responsable de obtener información de las estaciones de verificación, calcular la posición de los satélites, así como controlar los parámetros de los relojes.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

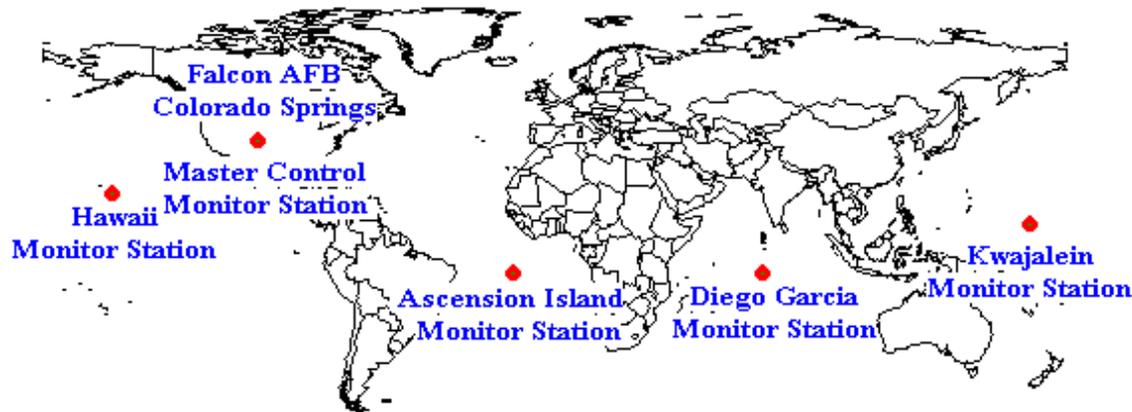
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA.-

#### SECTOR CONTROL.-

- **ESTACIONES VERIFICACIÓN.** Responsables de medir los datos que permiten obtener la Pseudodistancia. Rastreadores constantemente la red de satélites, determinando las efemérides y controlando las señales de los relojes.



Global Positioning System (GPS): estaciones Monitoras y estación de Control.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA.-

#### SECTOR USUARIO.-

- Se denomina así al conjunto de instrumentos que permite calcular las coordenadas de un punto, por medio de la recepción de las señales emitidas por la constelación de satélites Navstar.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA.-

#### SECTOR USUARIO.-

- Los componentes básicos de un equipo GPS de uso Geodésico son:
  - Sensor.
  - Antena.
  - Unidad de control / Ordenador.
  - Programa Base y programa de Proceso de datos.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### EVOLUCIÓN HISTÓRICA.-

- **4 de Octubre de 1957 (U.R.S.S.)**  
**SPUTNIK I:**
  - Peso: 83 kg.
  - Órbita excéntrica: altitudes entre 216 y 1136 Km.
  - Sólo emitió durante 3 semanas.
  - Periodo orbital: 96 minutos.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### EVOLUCIÓN HISTÓRICA.-

- **Proyecto:** Departamento de Defensa de los E.E.U.U.
- **Necesidades:** posicionar elementos militares con los dos condicionantes:
  - Independencia del lugar y del instante de la observación.
  - Independencia de las condiciones ambientales y de visibilidad.



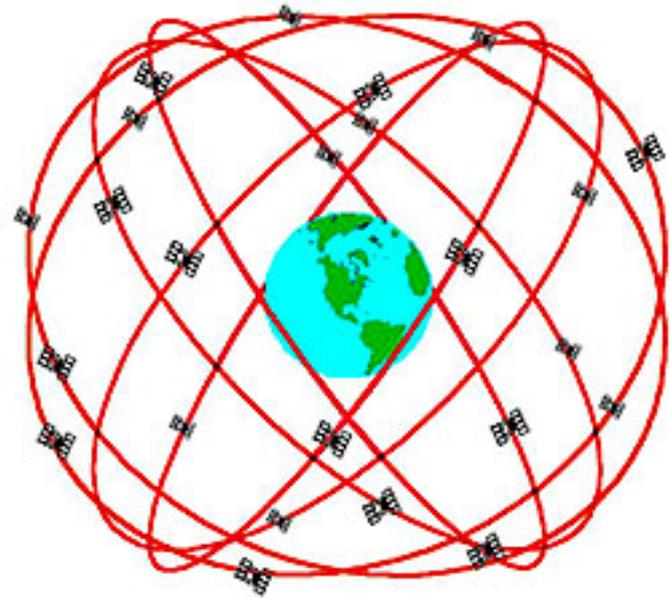
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### EVOLUCIÓN HISTÓRICA.-

- **Primer satélite:** febrero de 1978.
- 24 satélites.
- Dispuestos en 6 planos.
- Periodo orbital: 12 horas.
- Altitud: 20.180 km.
- Peso aproximado: 800 kg.
- Paneles solares: 7,2 m<sup>2</sup>.
- Osciladores atómicos.
- **Último satélite:** enero de 1994.



GPS Nominal Constellation.  
24 Satellites in 6 Orbital Planes.  
4 Satellites in each Plane.  
20.200 km Altitudes, 55 Degree Inclination.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

**SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-**

**TIPOLOGÍA DE LA SEÑAL EMITIDA.-**

**2 PORTADORAS:**

L1 → 1.575,42 MHz ;  $\lambda = 19,05$  cm.

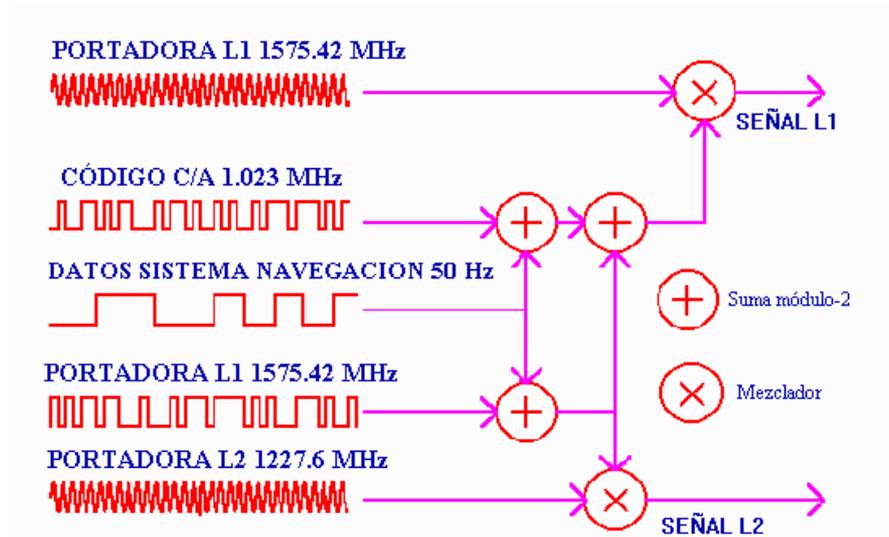
L2 → 1.227,60 MHz ;  $\lambda = 24,45$  cm.

**2 CÓDIGOS / 1 MENSAJE**

Frecuencia Fundamental 10,23 MHz

$L1 = 154 \cdot 10,23$

$L2 = 120 \cdot 10,23$



Señales de satélite GPS.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

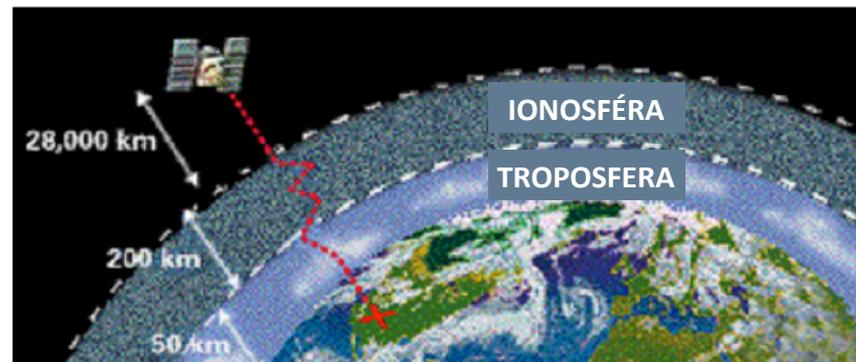
#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### PROPAGACIÓN DE LAS EMISIONES RADIOELÉCTRICAS.-

- Una onda electromagnética que proviene del espacio antes de alcanzar el receptor debe atravesar tres zonas características:

**VACÍO / IONOSFÉRA/ TROPOSOSFERA**

- **RETARDO:** incremento que sufre el tiempo de propagación de una señal electromagnética que atraviesa diferentes medios.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### PROPAGACIÓN DE LAS EMISIONES RADIOELÉCTRICAS.-

##### RETARDO EN EL VACÍO.-

- El Retardo en el vacío es prácticamente inexistente.

##### RETARDO EN LA IONOSFÉRA.-

- **IONOSFÉRA** ( $100 < H < 1000$  Km): las radiaciones solares ionizan las moléculas gaseosas liberando electrones.
- **RETARDO**: proporcional al número total de electrones libres encontrados por la señal en su camino, a igualdad de condiciones es función del cuadrado de la longitud de onda.



$$2 \text{ ns} < R < 50 \text{ ns.}$$

$$0,6 \text{ m} < R < 15 \text{ m.}$$

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

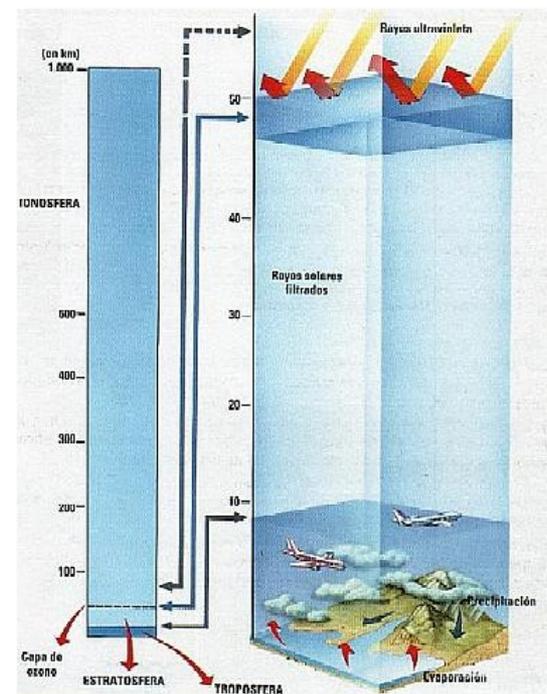
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### PROPAGACIÓN DE LAS EMISIONES RADIOELÉCTRICAS.-

#### RETARDO EN LA TROPOSFÉRA.-

- **TROPOSFÉRA** ( $0 < H < 100$  Km): es la última zona que produce retardo. Llega hasta los 80-100 Km, aunque sólo en los 40 Km más bajos se producen retardos significativos.
- **RETARDO**: proporcional al estado de la propia troposfera y su temperatura y humedad.



$$3 \text{ ns} < R < 100 \text{ ns.}$$

$$0,9 \text{ m} < R < 30 \text{ m.}$$

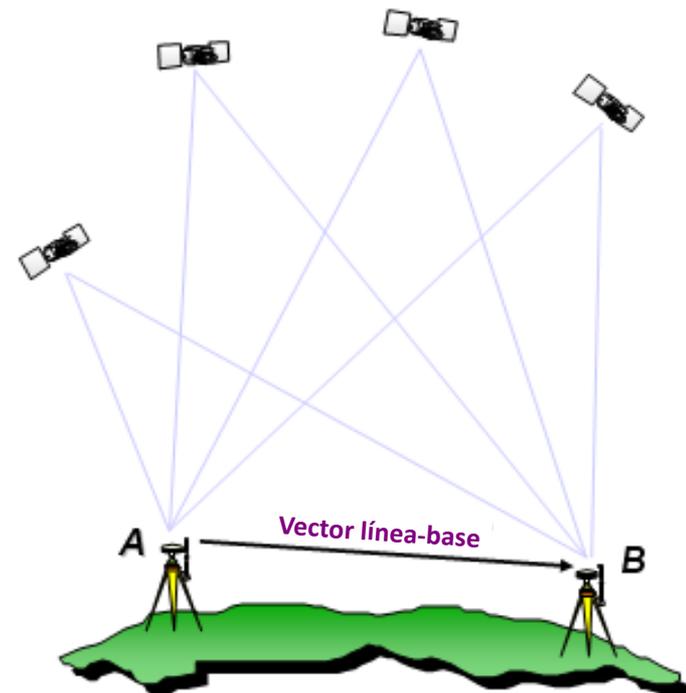
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### PROPAGACIÓN DE LAS EMISIONES RADIOELÉCTRICAS.-

- El hecho de que la propagación de las emisiones radioeléctricas genere incertidumbre en la medición de distancias, genera que se tenga que recurrir a los diferentes tipos de instrumental y metodología para obtener las precisiones necesarias en Geodesia.



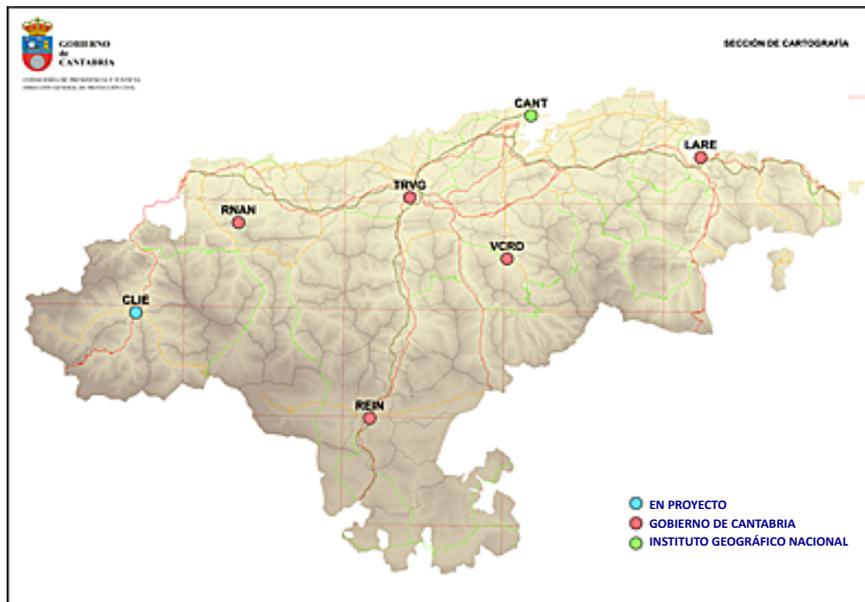
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

**SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-**

**PROPAGACIÓN DE LAS EMISIONES RADIOELÉCTRICAS.-**

**REDES PERMANENTES GNSS.-**



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

##### FUENTES DE ERROR.-

- **ERRORES DE SATÉLITE:**
  - Incertidumbre de la órbita.
  - Error de sincronización del satélite.
  - Errores del receptor.
  - Reloj del receptor.
  - Ruidos del receptor.
- **ERRORES DE OBSERVACIÓN:**
  - Retardo ionosférico.
  - Retardo troposférico.
- **ERRORES DE LA ESTACIÓN:**
  - Error multipath.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

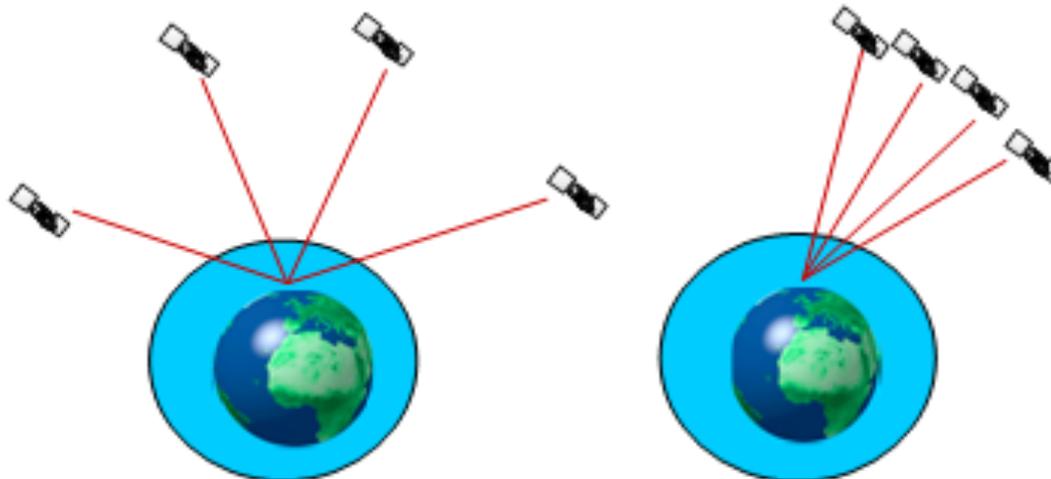
### 3.1. Métodos directos

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

**METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-**

**DILUCIÓN DE LA PRECISIÓN.-**

- Se denomina **DILUCIÓN DE LA PRECISIÓN** al parámetro que describe la contribución de la posición geométrica de los satélites en la incertidumbre de la medida de un punto fijo.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

#### DILUCIÓN DE LA PRECISIÓN.-

- El término en sí mismo puede tener diversas componentes:
  - **GDOP** (Geométrica): incluye Latitud, Longitud, Altura y tiempo.
  - **PDOP** (Posición): incluye latitud, longitud, y altura.
  - **HDOP** (Horizontal): incluye latitud, longitud.
  - **VDOP** (Vertical): incluye la altura.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

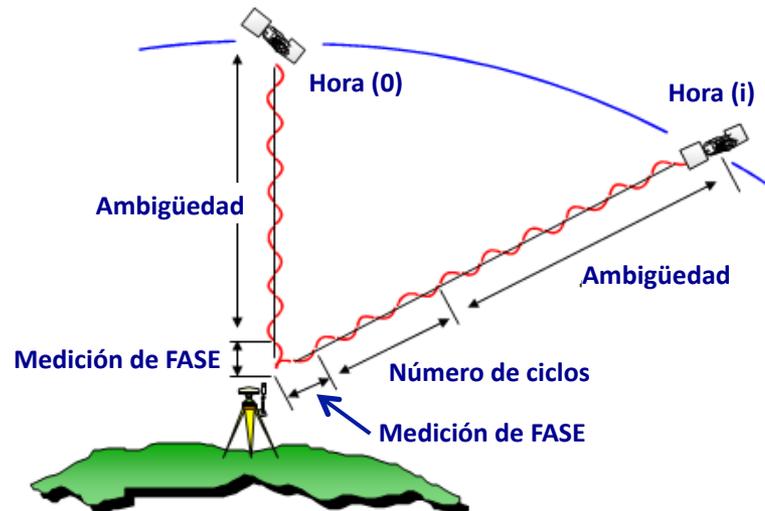
### 3.1. Métodos directos

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

**METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-**

**RESOLUCIÓN DE AMBIGÜEDADES.-**

- La ambigüedad inicial de la Fase debe determinarse, para usar este valor de distancia, como datos de fase medidas a través del tiempo.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

#### RESOLUCIÓN DE AMBIGÜEDADES.-

- Cuando la onda portadora llega a la antena habrá recorrido una distancia  $D$ , correspondiente a un cierto número entero  $N$  de sus longitudes de onda, llamado ambigüedad, más una cierta parte de longitud de onda.
- Después de eliminar los errores del reloj con el método de las dobles diferencias, se puede determinar el número entero de longitudes de onda más la fracción de longitud de onda entre el satélite y la antena del receptor. El problema radica en la existencia de muchos "juegos" posibles de longitudes de onda enteras para cada satélite, de aquí que la solución sea ambigua.

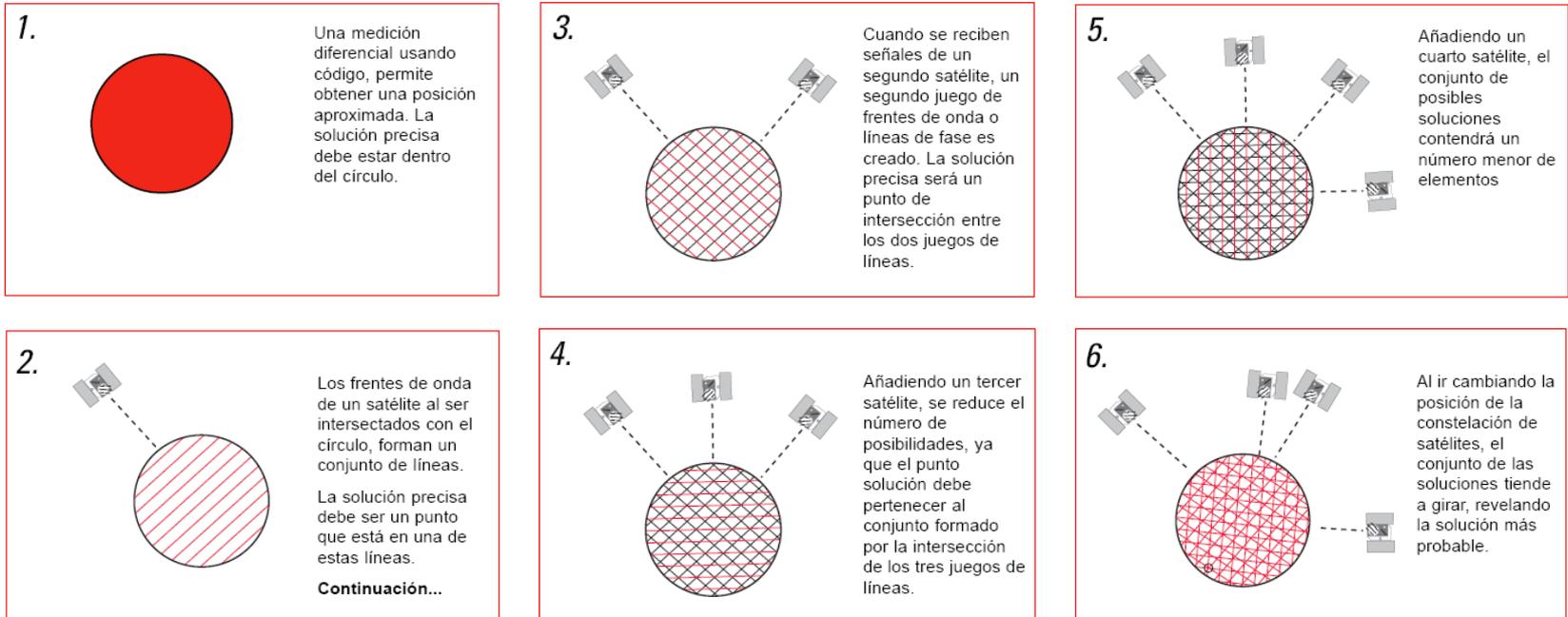
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

#### RESOLUCIÓN DE AMBIGÜEDADES.-



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

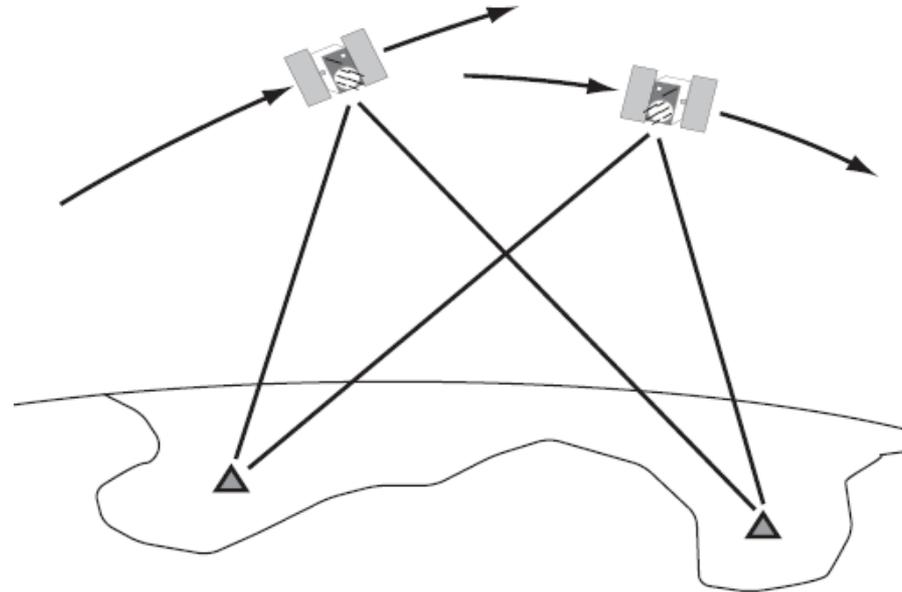
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

#### RESOLUCIÓN DE AMBIGÜEDADES.-

- Es fundamental en el sistema no perder el seguimiento de la fase para que la ambigüedad inicial no pueda variar. Si hay una pérdida de recepción por cualquier causa la cuenta de ciclos se rompe y se tiene una pérdida de ciclos, aunque mediante un ajuste polinómico en postproceso, es posible restaurar la cuenta original y recuperar la ambigüedad inicial.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

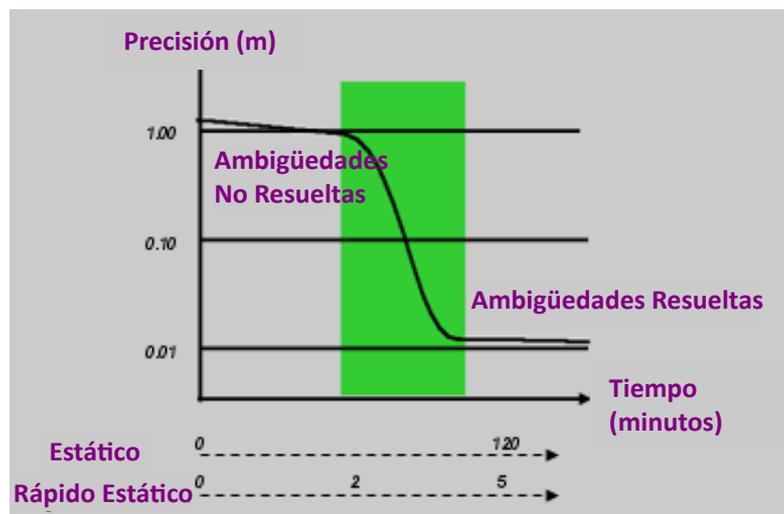
### 3.1. Métodos directos

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

**METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-**

**RESOLUCIÓN DE AMBIGÜEDADES.-**

- Una vez que se resuelven las ambigüedades, la exactitud de la medida no mejora significativamente con el tiempo.

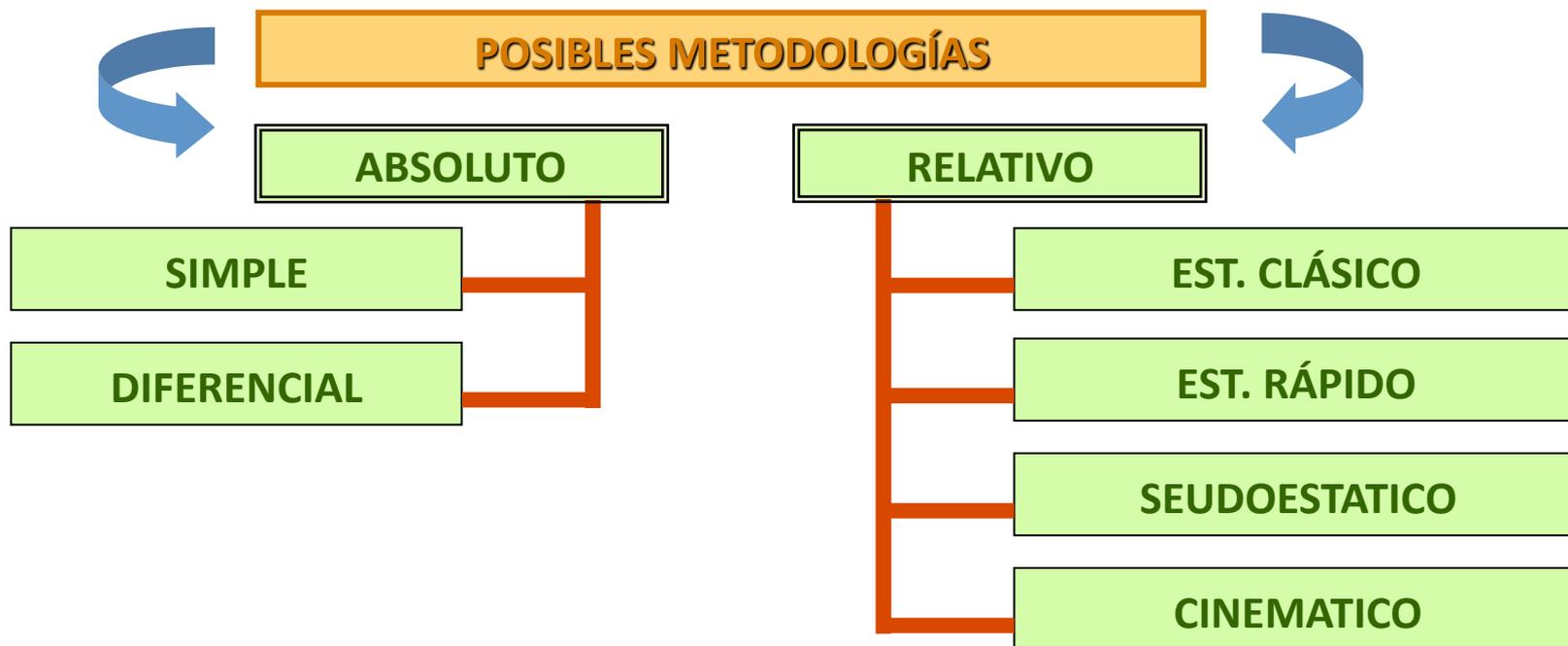


## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

**METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-**



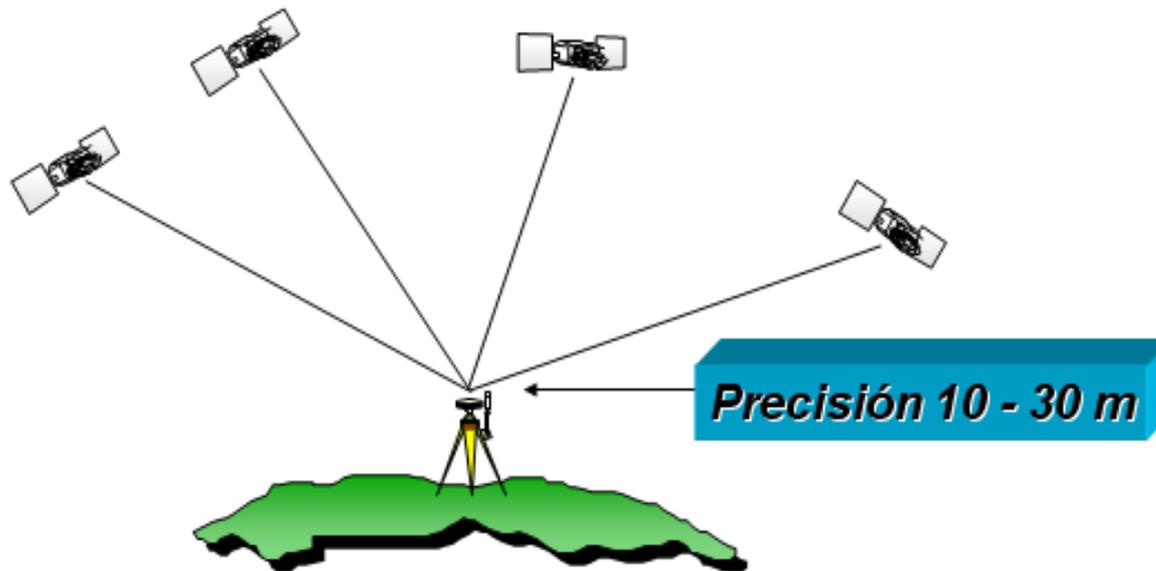
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

**METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-**

**MÉTODOS ABSOLUTOS.-**



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

#### MÉTODOS ABSOLUTOS.-

##### • MÉTODO ABSOLUTO SIMPLE:

##### – Equipo:

- 1 receptor código.
- Cálculo de la posición del receptor empleando pseudodistancias, a partir del código.

##### – Precisión:

- ESTÁTICO. Postproceso 5-10 m.
- DINÁMICO. Tiempo Real 15-30 m.



Resultados (X, Y, Z).  
Pseudodistancias.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

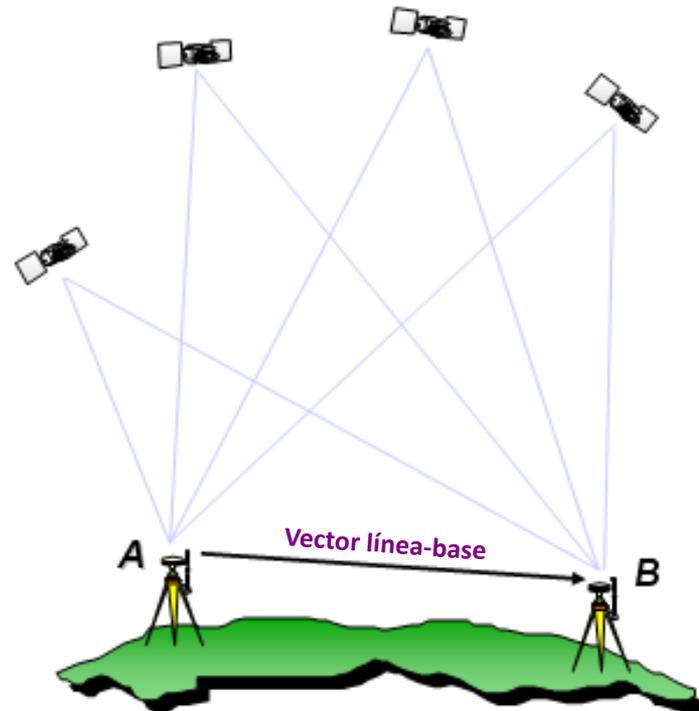
### 3.1. Métodos directos

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

**METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-**

**MÉTODOS ABSOLUTOS.-**

- **MÉTODO ABSOLUTO DIFERENCIAL.**



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

#### MÉTODOS ABSOLUTOS.-

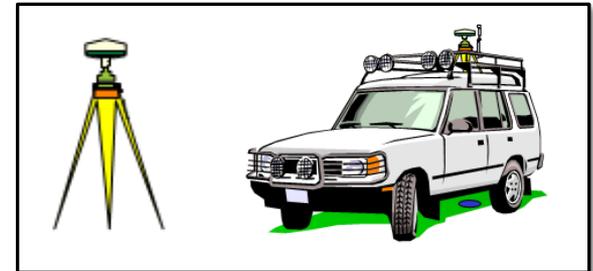
#### • MÉTODO ABSOLUTO DIFERENCIAL:

##### – Equipo:

- 1 receptor móvil código.
- 1 receptor base código.
- El receptor base calcula la corrección diferencial, aplicándola después al/los receptores.
- Receptores base y móvil deben observar a 4 satélites idénticos.

##### – Precisión: 1-5 m.

#### Receptor móvil



Receptor base  
(X, Y, Z) WGS  
conocidas.

Resultados (X, Y, Z)  
Seudodistancias.  
Tiempo Real o postproceso.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

#### MÉTODOS RELATIVOS.-

#### • POSIBLES METODOLOGÍAS DENTRO DEL RELATIVO:

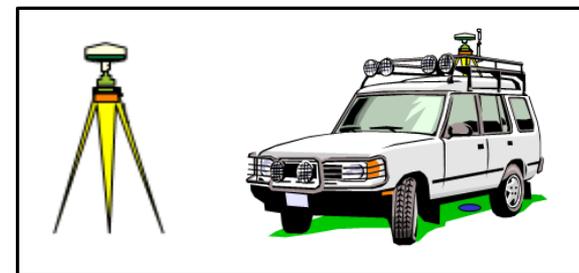
##### – Estático:

- Estático CLÁSICO.
- Estático RÁPIDO.

##### – Dinámico:

- Seudoestático.
- Cinemático (RTK).

#### Receptor móvil



Receptor base  
(X, Y, Z) WGS  
conocidas.

Observable FASE  
Resultados  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $d_z$ .  
Tiempo real o postproceso.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

#### MÉTODOS RELATIVOS.-

##### • MÉTODO RELATIVO ESTÁTICO CLÁSICO:

##### – Equipo:

- 1 receptor móvil fase (Mono/Bi).
- 1 receptor base fase (Mono/Bi).

##### – Tiempo:

- 45 minutos → Baselines < 6 km.
- 60 minutos → Baselines < 10 km.
- > 60 minutos → Baselines > 10 km.

##### – Observación:

- 4 Satélites comunes y PDOD < 5.

##### – Precisión:

- Monofrecuencia 10 mm + 2 ppm.
- Bifrecuencia 5 mm + 1 ppm.

##### – Aplicaciones:

- Control de precisión.
- Redes Geodésicas.
- Apoyos fotogramétricos.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

##### MÉTODOS RELATIVOS.-

#### • MÉTODO RELATIVO ESTÁTICO RÁPIDO:

##### – Equipo:

- 1 receptor móvil fase (Bifrecuencia).
- 1 receptor base fase (Bifrecuencia).

##### – Tiempo:

- 10 minutos → Baselines < 6 km.
- 15 minutos → Baselines < 10 km.
- > 20 minutos → Baselines > 10 km.

##### – Observación:

- 4 Satélites comunes y PDOD < 5.

##### – Precisión:

- Bifrecuencia 5 mm + 1 ppm.

##### – Aplicaciones:

- Control de precisión.
- Redes Geodésicas.
- Apoyos fotogramétricos.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

##### MÉTODOS RELATIVOS.-

##### • MÉTODO RELATIVO SEUDOESTÁTICO:

##### – Equipo:

- 1 receptor móvil fase (Mono/Bi).
- 1 receptor base fase (Mono/Bi).

##### – Tiempo:

- Dos ocupaciones de 10 minutos separadas una hora entre sí.

##### – Observación:

- 4 Satélites comunes y PDOD < 5.

##### – Precisión:

- Monofrecuencia 20 mm + 2 ppm.

##### – Aplicaciones:

- Control de precisión.
- Redes Geodésicas.
- Apoyos fotogramétricos.

**OPCIÓN CINEMÁTICO**

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y PROCESADO.-

#### MÉTODOS RELATIVOS.-

##### • MÉTODO RELATIVO CINEMÁTICO (RTK):

##### – Equipo:

- 1 receptor móvil fase (Bifrecuencia).
- 1 receptor base fase (Bifrecuencia).

##### – Tiempo:

- Inicialización 10 minutos.
- Itinerario 4 seg/punto.

##### – Observación:

- 4 Satélites comunes y PDOD < 5.

##### – Precisión:

- Monofrecuencia 20 mm + 2 ppm.

##### – Aplicaciones:

- Densificación de redes.
- Levantamientos topográficos.
- Replanteos.

**OPCIÓN CINEMÁTICO**

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

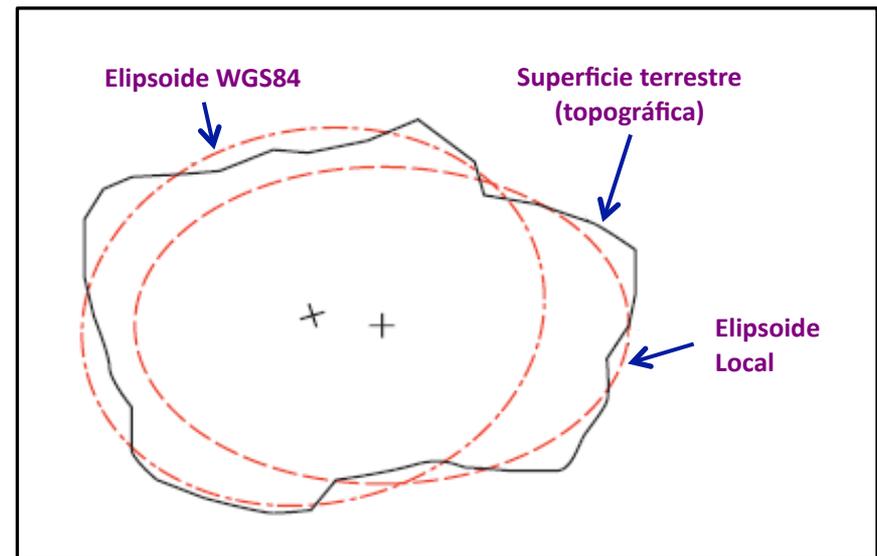
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### SISTEMA DE REFERENCIA.-

- Cuando se utiliza GPS, las coordenadas de las posiciones calculadas están basadas en el elipsoide WGS84.
- Generalmente, las coordenadas existentes están en el sistema de coordenadas locales, por lo que las coordenadas GPS deben ser transformadas a este sistema local.

#### Relación entre los elipsoides y la superficie terrestre



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

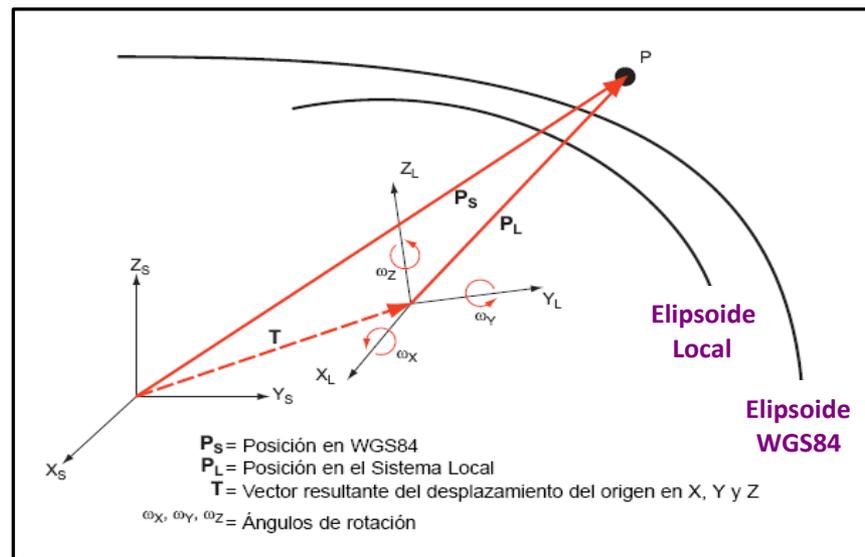
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### SISTEMA DE REFERENCIA.-

- La transformación de 7 parámetros de Helmert ofrece una transformación matemáticamente correcta. Esta transformación conserva la precisión de las mediciones GPS y las coordenadas locales.

#### Transformación de 7 parámetros de Helmert



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

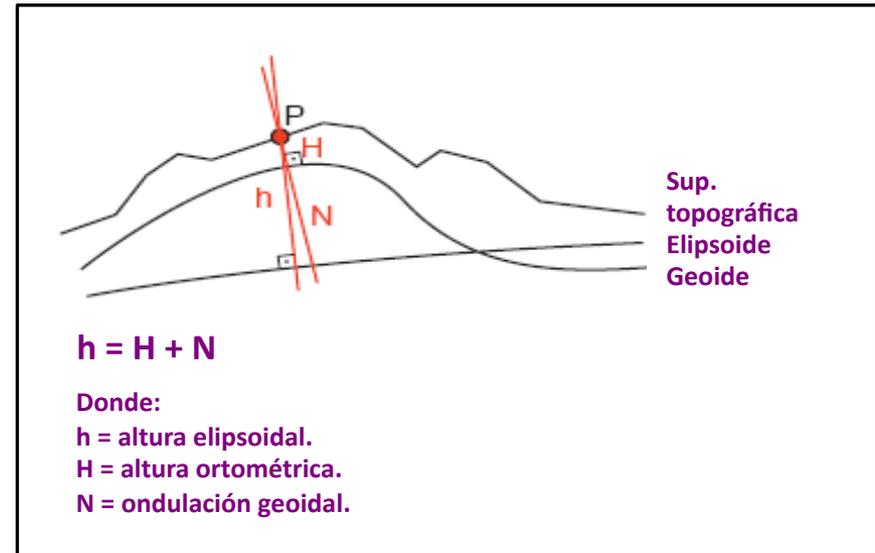
### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### SISTEMA DE REFERENCIA.-

- El problema altimétrico derivado de la diferencia de orígenes altimétricos (Geoide y Elipsoide), es resuelto mediante el uso de modelos geoidales para convertir las alturas elipsoidales en alturas ortométricas.

#### Relationship between Orthometric and Ellipsoidal height



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.-

#### VENTAJAS GPS.-

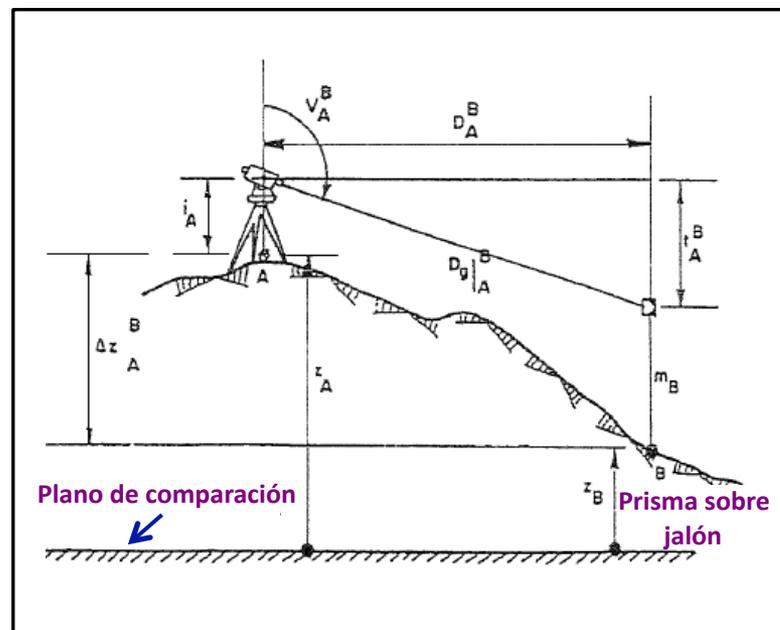
- No requiere visibilidad directa y permite visuales muy largas.
- Las observaciones no dependen del observador.
- Independencia relativa de las condiciones atmosféricas.
- Mejor precisión que en Topografía clásica en contextos amplios.
- Puede operarse día y noche.
- Más rápido y requiere menos personal.
- Sistema de coordenadas común.
- Mejores rendimientos y ventajas económicas.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.1. Métodos directos

#### EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CLÁSICO.-

- Las Estaciones Topográficas permiten generar y almacenar los resultados de sus medidas en formato digital, para posteriormente volcar y procesar datos de forma automática. Algunas aplicaciones de MDT incorporan utilidades que permiten el tratamiento e incorporación de los datos en este tipo de datos.
- El rendimiento y coste de este tipo de captura de datos solamente es viable cuando la superficie que se plantea es muy pequeña o se requiere un nivel de detalle elevado.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### FUNDAMENTOS.-

- Se consideran métodos indirectos en la captura de la información a todos aquéllos que NO requieren la interacción y, por tanto, el contacto directo con el territorio que se pretende levantar.
- Entre los métodos que se han acabado imponiendo en esta disciplina se encuentran:
  - Digitalización de mapas.
- Fotogrametría.
  - Lidar.
  - Teledetección.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### DIGITALIZACIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS.-

- La digitalización de los mapas topográficos preexistentes, permite el aprovechamiento de una ingente cantidad de cartografía disponible exclusivamente en formato papel clásico. Esta operación puede realizarse de forma manual (mediante un tablero digitalizador) o automáticamente (mediante sensores ópticos de exploración).



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### DIGITALIZACIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS.-

- La digitalización automática es una línea de investigación en constante desarrollo, puesto que los métodos de digitalización manual son lentos y muy costosos dentro del total de procesos. Actualmente se utilizan escáneres que detectan un cierto número de niveles de gris (o componentes de color) en un mapa original mediante sensores ópticos. Existen dos variantes básicas en función del formato del resultado, vectorial o *ráster*.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### DIGITALIZACIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS.-

- La digitalización mediante escáneres genera salidas vectoriales, que en el caso de mapas sencillos y limpios de información imprecisa, supera en eficacia a la digitalización manual. Aunque si la información es compleja puede ser considerablemente más lento.

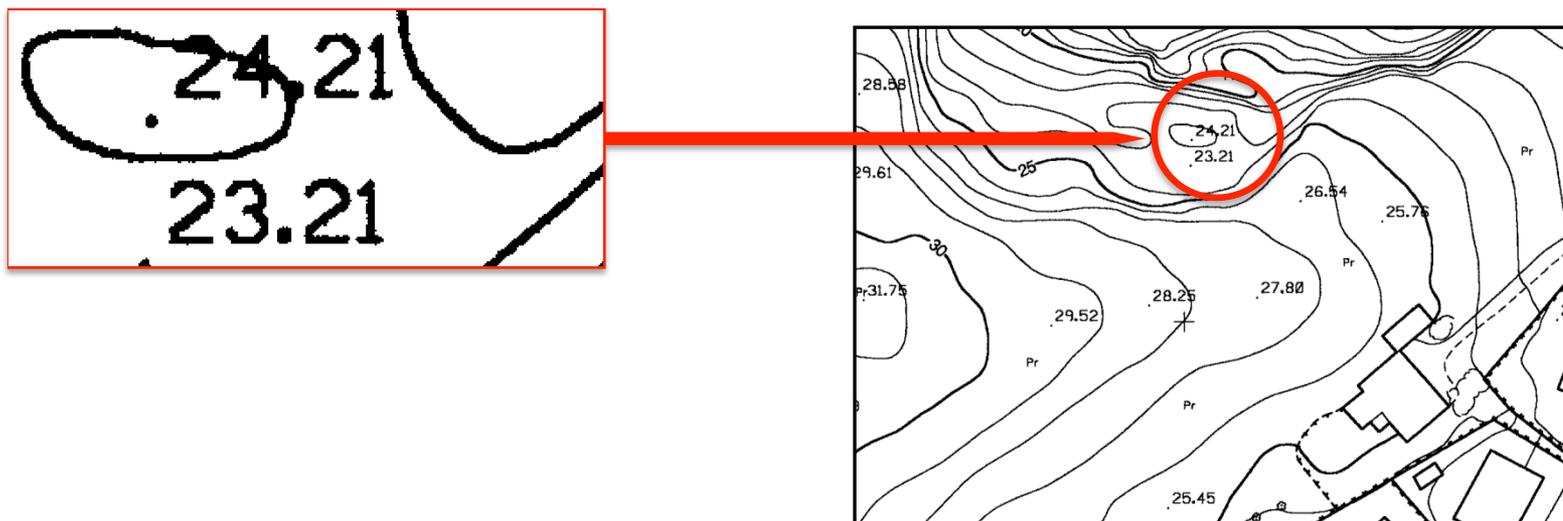


## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### DIGITALIZACIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS.-

- La digitalización mediante escáneres también puede generar salidas en formato ráster cuando el barrido se hace de acuerdo con un esquema matricial. La salida digital es una matriz de valores de gris, de componentes primarios (amarillo, cian y magenta) en los dispositivos sensibles al color o, simplemente, de blanco y negro.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### DIGITALIZACIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS.-

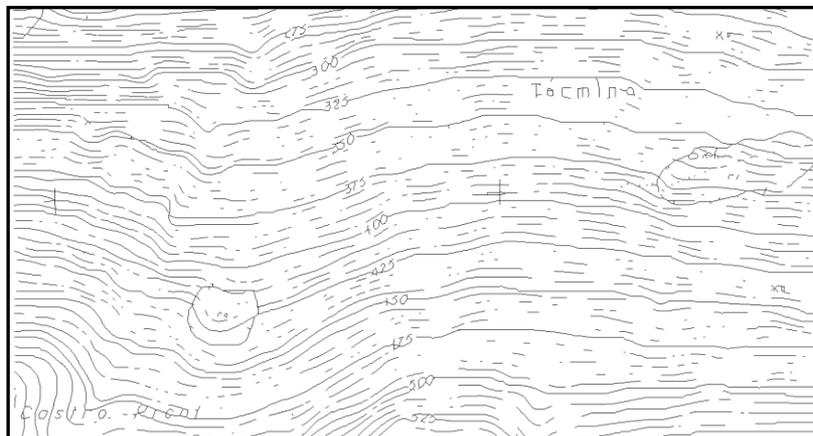
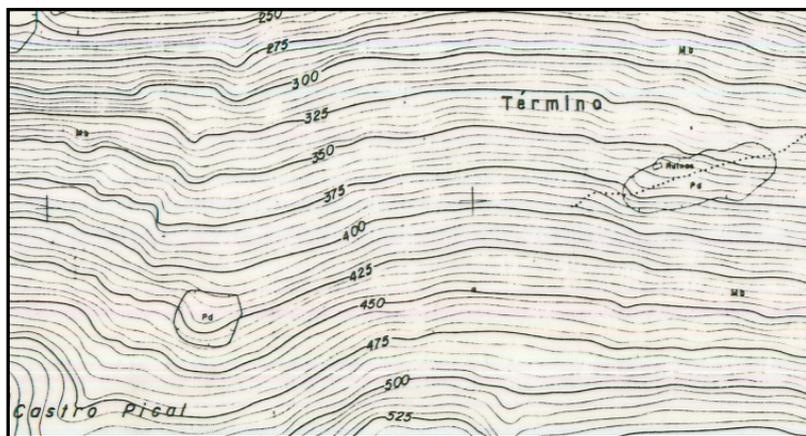
- La generación de esta matriz es un proceso simple, pero constituye una información que no es aprovechable directamente para la construcción del modelo digital. Para transformar el conjunto de datos en algo útil se sigue un proceso de vectorización de este archivo ráster que, para un mapa topográfico, implica las siguientes fases:
  1. Filtrado de la imagen ráster, se fija un valor umbral de gris de forma que a todos los píxeles se asignen a blanco o negro, de forma que la imagen se contrasta fuertemente.
  2. Vectorización de la imagen contrastada, de forma que los píxeles adyacentes se estructuran en líneas, generándose una imagen vectorial.
  3. Edición y revisión por parte de un operador, ya que los procesos descritos suelen ofrecer resultados plagados de errores.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### DIGITALIZACIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS.-

- Cabe reseñar que esta técnica sólo se usa cuando se desea aprovechar información cartográfica preexistente y que bajo esta premisa es totalmente acertada. Por el contrario, la digitalización de mapas topográficos conlleva mucho trabajo manual de edición y revisión, en el mejor de los casos, lo que suele encarecer la información además de conllevar muchos errores humanos.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA.-

- En las operaciones de restitución se utiliza como documento básico un conjunto de pares estereoscópicos de imágenes de la zona a estudiar.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA.-

- Actualmente, a estas fotografías se han sumado las imágenes digitales, tomadas bien desde aviones o incluso por sensores pancromáticos transportados por satélite.
- El trabajo se basa en métodos que permiten determinar el paralajes y desniveles entre puntos de un par estereoscópico. Actualmente existen restituidores completamente automatizados que realizan esta labor grabando directamente los resultados en un formato digital, en este caso, los pares estereoscópicos son analizados mediante sistemas ópticos de exploración.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TÉCNICAS LIDAR.-

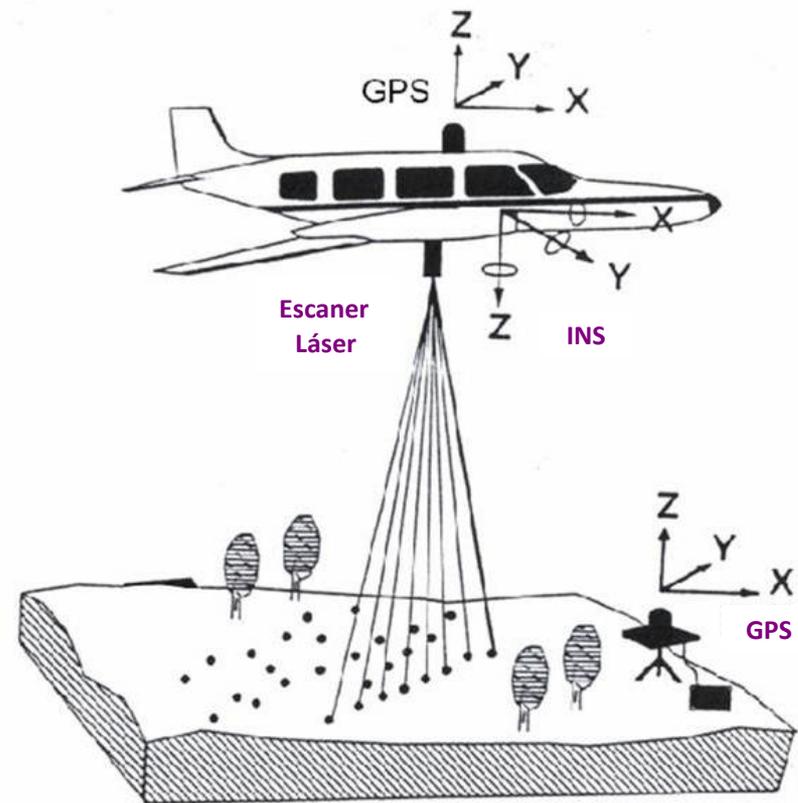
- **LIDAR** es un acrónimo del inglés *Laser Imaging Detection and Ranging*, es una tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. Al igual que ocurre con la tecnología radar, donde se utilizan ondas de radio en vez de luz, la distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada.
- El **LIDAR** (*Light Detection And Ranging*) es un sistema que permite obtener una nube de puntos del terreno tomándolos mediante un escáner láser aerotransportado (ALS). Para realizar este escaneado se combinan dos movimientos. Uno longitudinal dado por la trayectoria del avión y otro transversal mediante un espejo móvil que desvía el haz de luz láser emitido por el escáner.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TÉCNICAS LIDAR.-

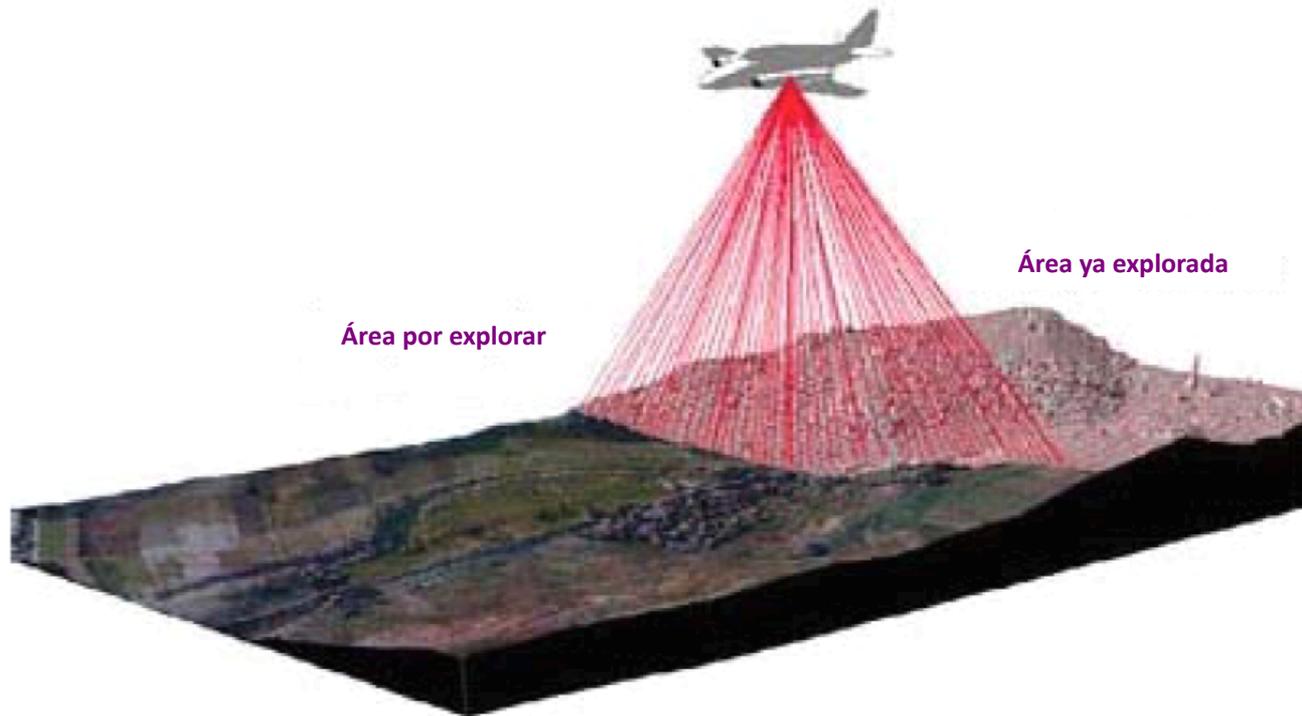
- Para conocer las coordenadas de la nube de puntos se necesita la posición del sensor y el ángulo del espejo en cada momento. Para ello el sistema se apoya en un sistema GPS diferencial y un sensor inercial de navegación (INS). Conocidos estos datos y la distancia sensor-terreno obtenida con el distanciómetro se obtienen las coordenadas buscadas. El resultado es de decenas de miles de puntos por segundo.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TÉCNICAS LIDAR.-

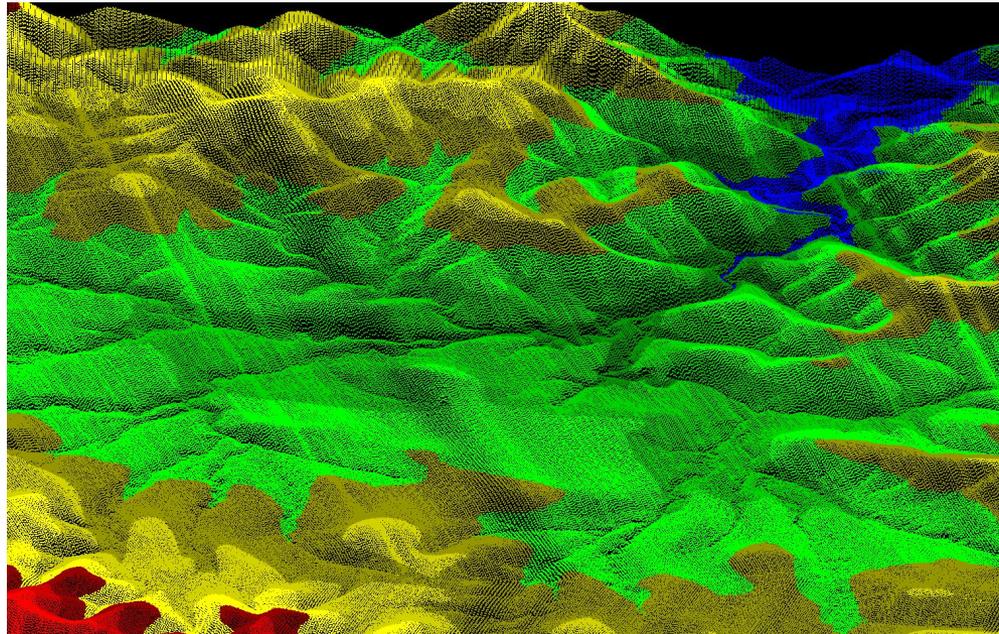


## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TÉCNICAS LIDAR.-

- Sin duda alguna es una de las mejores técnicas que existen en la actualidad para obtener información que permita la generación de MDT.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TÉCNICAS LIDAR.-

#### COMPONENTES DE UN EQUIPO LIDAR.-

1. **ALS (Escáner Láser Aerotransportado)**. Emite pulsos de luz infrarroja que servirán para determinar la distancia entre el sensor y el terreno.
2. **GPS Diferencial**. Mediante el uso de un receptor en el avión y uno o varios en estaciones de control terrestres (en puntos de coordenadas conocidas), se obtiene la posición y altura del avión.
3. **INS (Sistema Inercial de Navegación)**. Informa de los giros y de la trayectoria del avión.
4. **Cámara de video digital (opcional)**. Permite obtener una imagen de la zona de estudio, que servirá para facilitar la interpretación de los resultados. Se suele incorporar junto al ALS.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TÉCNICAS LIDAR.-

#### TIPOS DE LÁSER.-

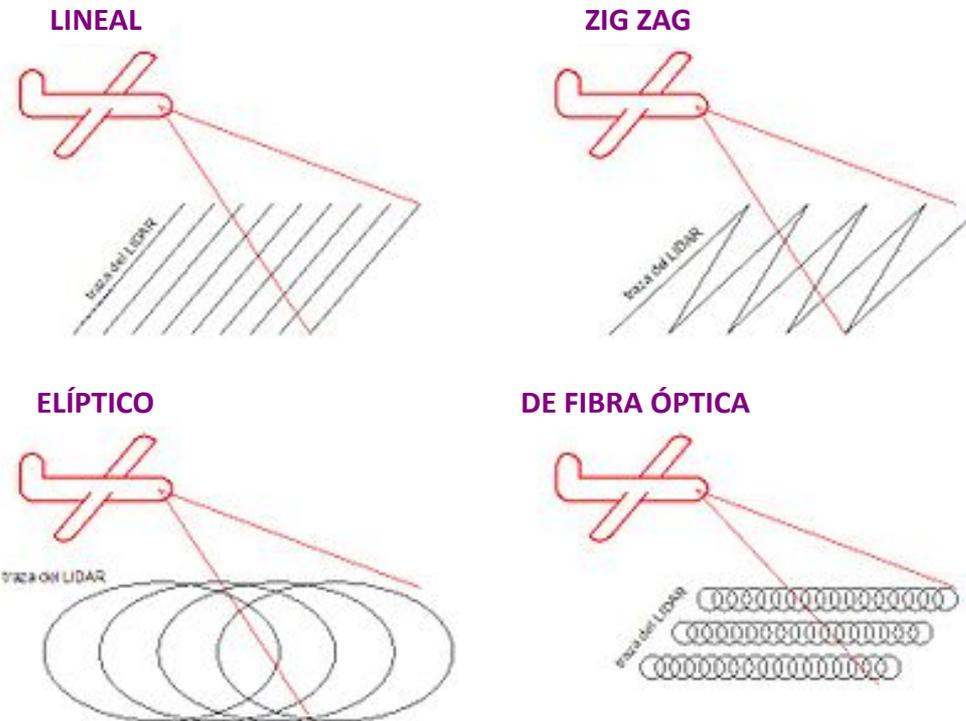
- 1. LIDAR DE PULSOS.** El proceso para la medición de la distancia entre el sensor y el terreno se lleva cabo mediante la medición del tiempo que tarda un pulso desde que es emitido hasta que es recibido. El emisor funciona emitiendo pulsos de luz.
- 2. LIDAR DE MEDICIÓN DE FASE.** En este caso el emisor emite un haz láser continuo. Cuando recibe la señal reflejada mide la diferencia de fase entre la emitida y la reflejada. Conocida esta solo hay que resolver el número de longitud de ondas enteras que ha recorrido (ambigüedades).

# 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

## 3.2. Métodos indirectos

TÉCNICAS LIDAR.-

TIPOS DE BARRIDOS.-

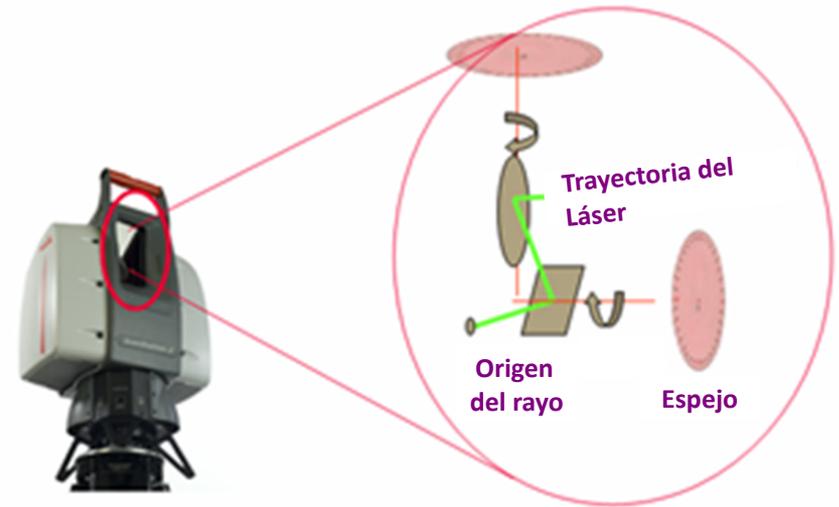
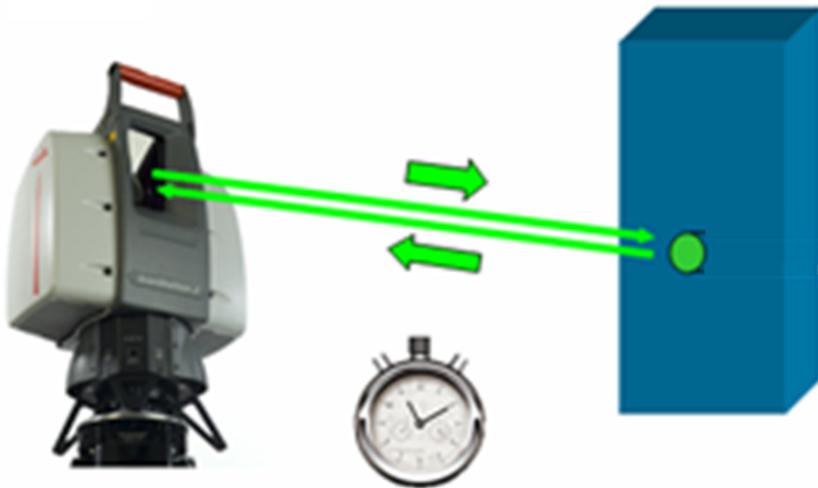


## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

TÉCNICAS LIDAR.-

LÁSER ESCÁNER TERRESTRE.-

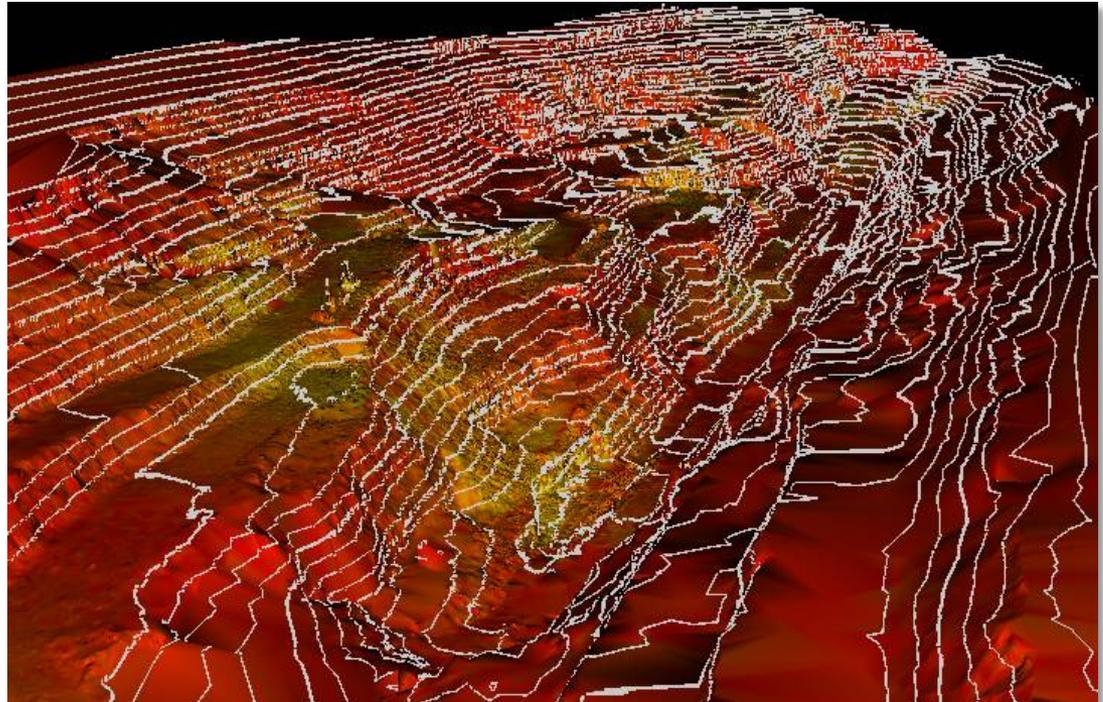
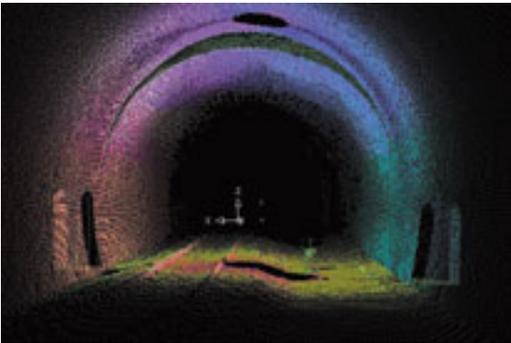


## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

TÉCNICAS LIDAR.-

LÁSER ESCÁNER TERRESTRE.-

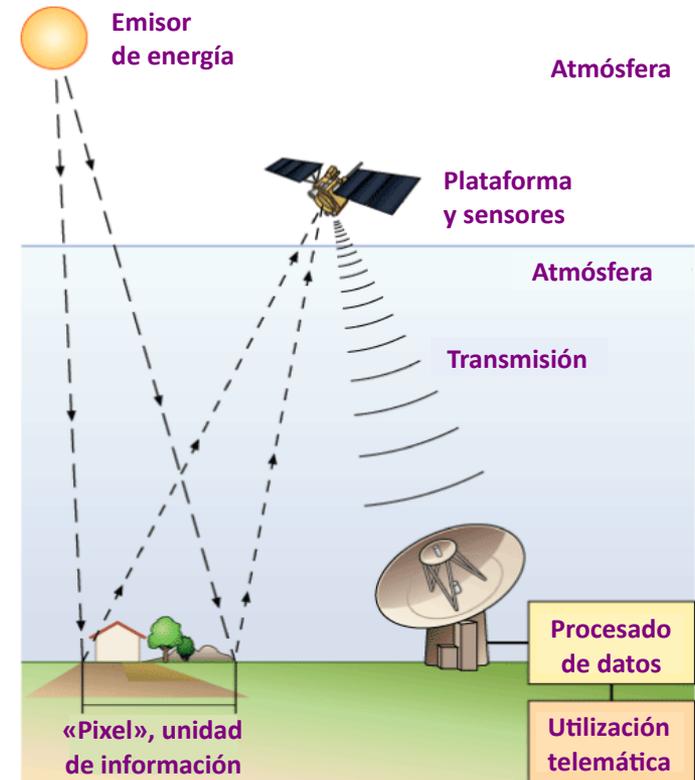


## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### ALTIMETROS, GPS Y ESTACIONES ESPACIALES.-

- Algunos satélites han incorporado altímetros entre sus instrumentos, con lo que se hace posible, el registro directo de los datos altimétricos en formato digital. Las características de estos altímetros hacen de ellos aparatos extremadamente precisos: el transportado por el **satélite ERS-1** (iniciales de *European Remote-Sensing Satellite*) es un radar de 13.8 GHz con un error nominal de apenas unos centímetros.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### ALTIMETROS, GPS Y ESTACIONES ESPACIALES.-

- Una novedad en este campo fue el lanzamiento del **satélite SPOT** en 1986, que incorporaba la posibilidad de obtener imágenes estereoscópicas mediante variaciones en el ángulo de vista, programables desde tierra. La calidad de la información obtenida para hacer un MDT es perfecta-mente comparable con los obtenidos mediante los métodos fotogramétricos convencionales.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

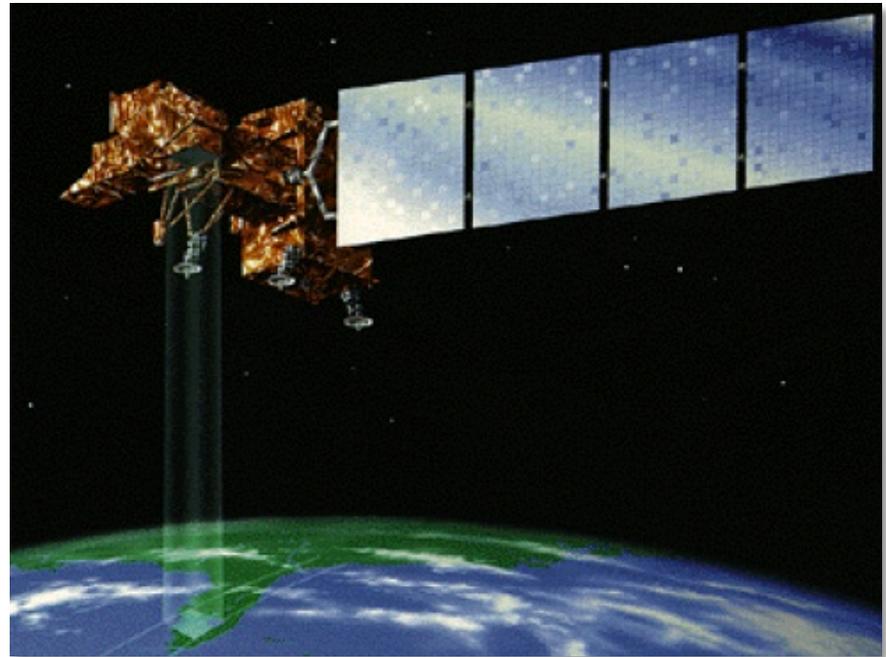
### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN.-

##### DEFINICIÓN.-

- Se define **TELEDETECCIÓN** como la adquisición de información en torno a un objeto, mediante la adquisición de imágenes de la superficie terrestre, desde sensores instalados en plataformas espaciales, el término proviene del vocablo inglés Remote Sensing.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

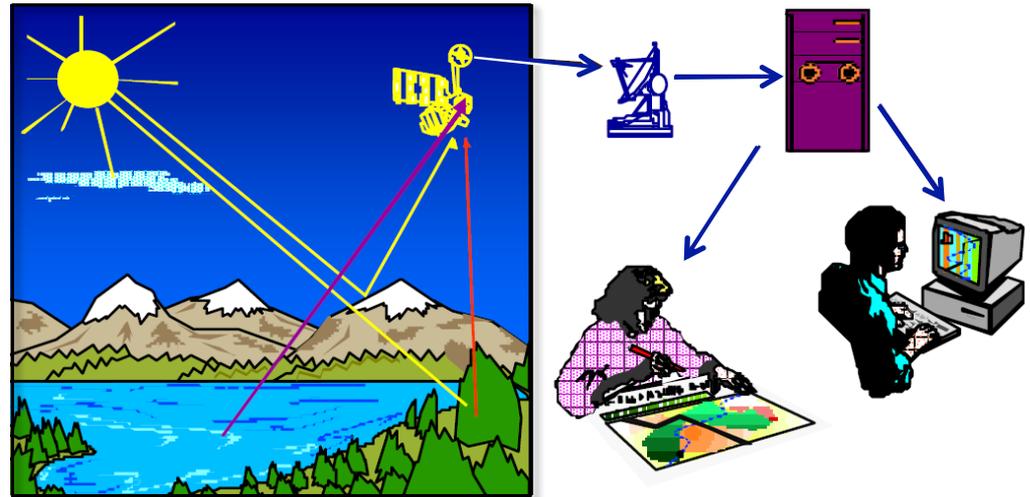
### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN.-

#### TIPOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN.-

- La información se debe caracterizar por tener las siguientes propiedades:
  - Periódica.
  - Grandes superficies.
  - Elementos visibles y no visibles.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### ELEMENTOS CONSTITUYENTES.-

##### FUENTES DE ENERGÍA.-

- Supone el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. La fuente de energía más importante es el Sol.

##### CUBIERTA TERRESTRE.-

- Formada por todos los elementos existentes en la superficie terrestre, recibe la señal procedente de la fuente de energía y la refleja de acuerdo a sus características físicas.

##### SISTEMA SENSOR.-

- Está compuesto por el propio sensor y la plataforma que lo alberga, capta la energía reflejada de la cubierta terrestre, la codifica, la graba y la envía directamente al sistema de recepción.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### ELEMENTOS CONSTITUYENTES.-

##### SISTEMA DE RECEPCIÓN-COMERCIALIZACIÓN.-

- Sistema que recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado y tras las oportunas correcciones se distribuye.

##### INTÉRPRETE.-

- Convierte los datos en información temática de interés ya sea visual o digitalmente de cara a facilitar la evaluación del problema de estudio.

##### USUARIO FINAL.-

- Encargado de analizar el documento fruto de la interpretación así como de dictaminar las consecuencias que del propio documento se deriven.

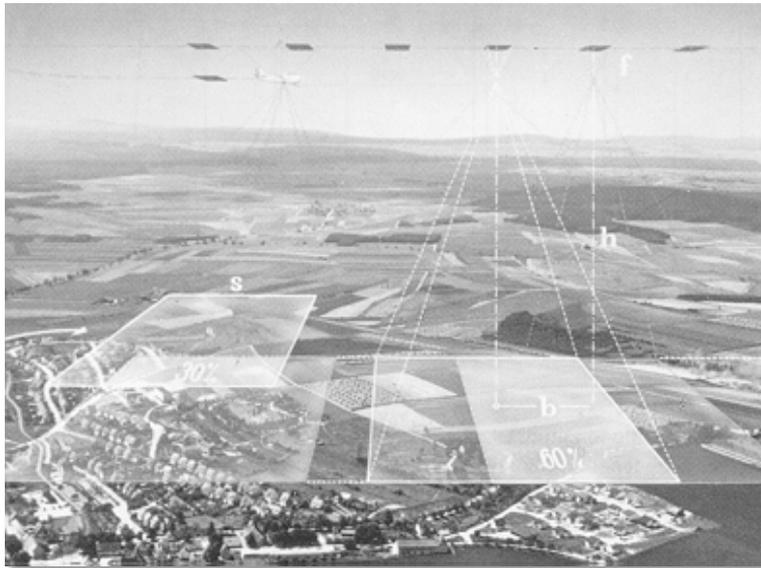
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

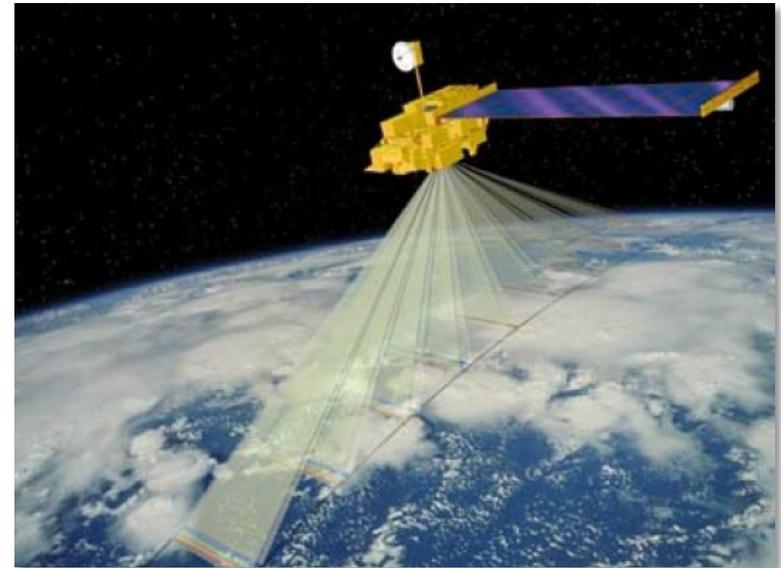
**TELEDETECCIÓN.-**

**RESEÑA HISTÓRICA.-**

Antes años 60



Después años 60



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### RESEÑA HISTÓRICA.-

- **1957.** Primer satélite artificial (Sputnik).
- **1959.** Se inventan los exploradores multiespectrales.
- **1966.** Primeras fotos espaciales (Apolo 9).
- **1967.** Se inventa el Radar de apertura Sintética.
- **1972.** Landsat 1 (4 bandas espectrales).
- **1977.** Meteosat 1 (Pancromático + IR).
- **1986.** Spot 1 (Pancromático y multibanda con 10m de res.).
- **1991.** Lanzamiento del primer satélite de la ESA.
- **1999.** Lanzamiento de Ikonos (Resolución espacial 1 m.)

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### PRINCIPALES VENTAJAS.-

- Observación y visión global.
- Observación a distintas escalas.
- Coberturas frecuentes.
- Homogeneidad en al adquisición.
- Regiones no visibles del espectro.
- Formato digital.

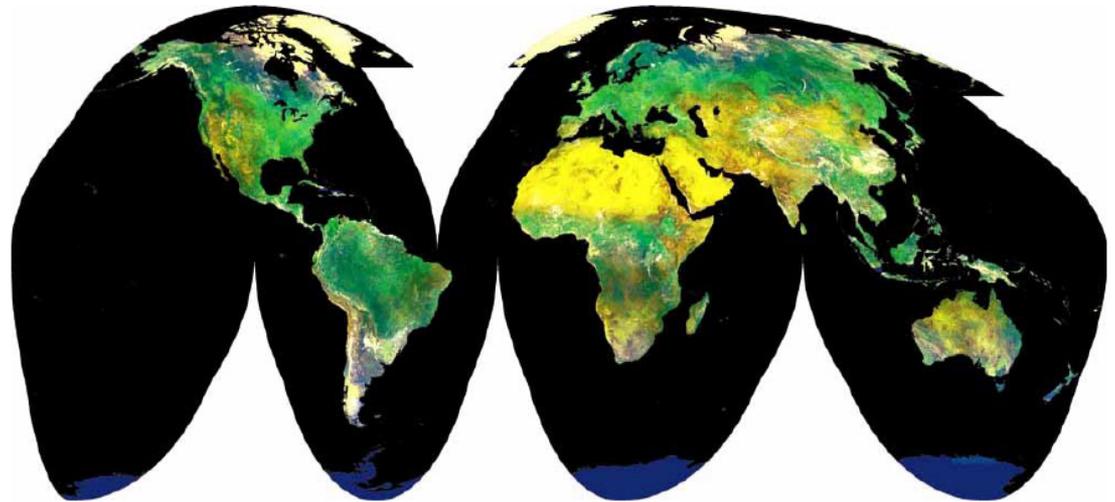
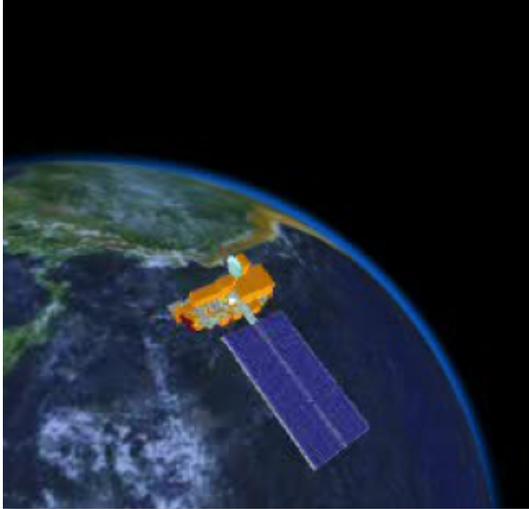
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

**TELEDETECCIÓN.-**

**PRINCIPALES VENTAJAS.-**

**OBSERVACIÓN Y VISIÓN GLOBAL.-**



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

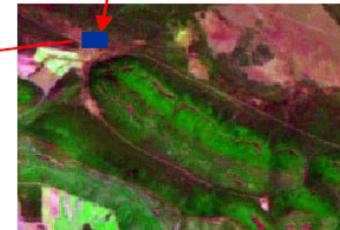
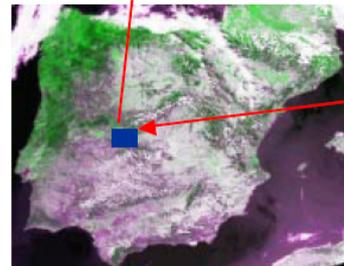
**TELEDETECCIÓN.-**

**PRINCIPALES VENTAJAS.-**

**OBSERVACIÓN A DISTINTAS ESCALAS.-**



Imágenes: MODIS (500 m).  
Landsat (30 m).  
Ikonos (1 m).



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

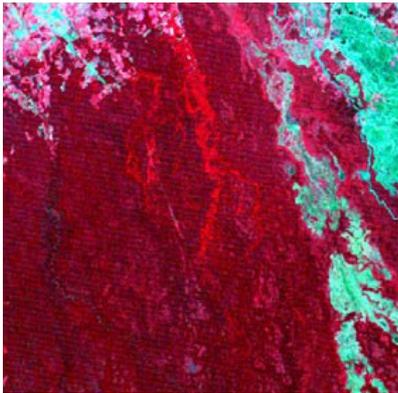
### 3.2. Métodos indirectos

**TELEDETECCIÓN.-**

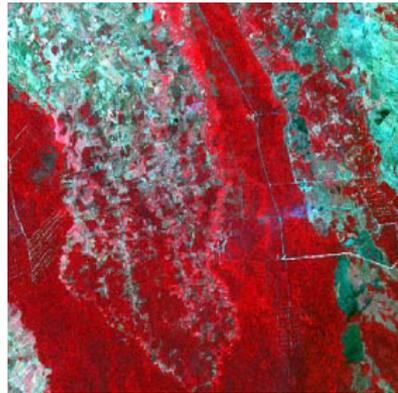
**PRINCIPALES VENTAJAS.-**

**OBSERVACIÓN CON DISTINTAS COBERTURAS.-**

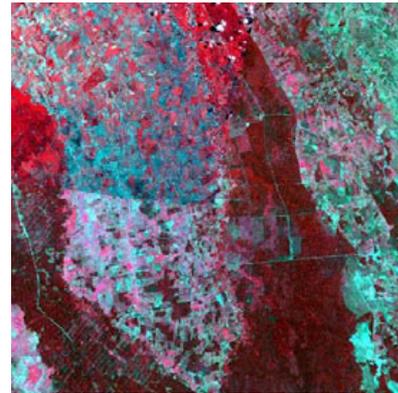
1972



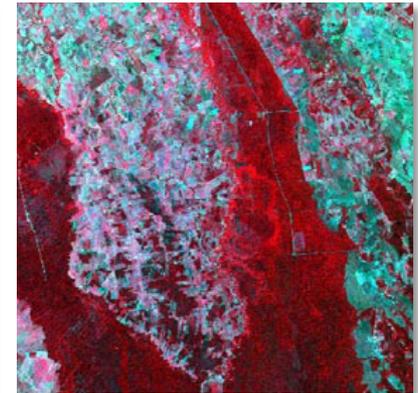
1993



1989



1998



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

**TELEDETECCIÓN.-**

**PRINCIPALES VENTAJAS.-**

**HOMOGENEIDAD EN LA ADQUISICIÓN DE DATOS.-**



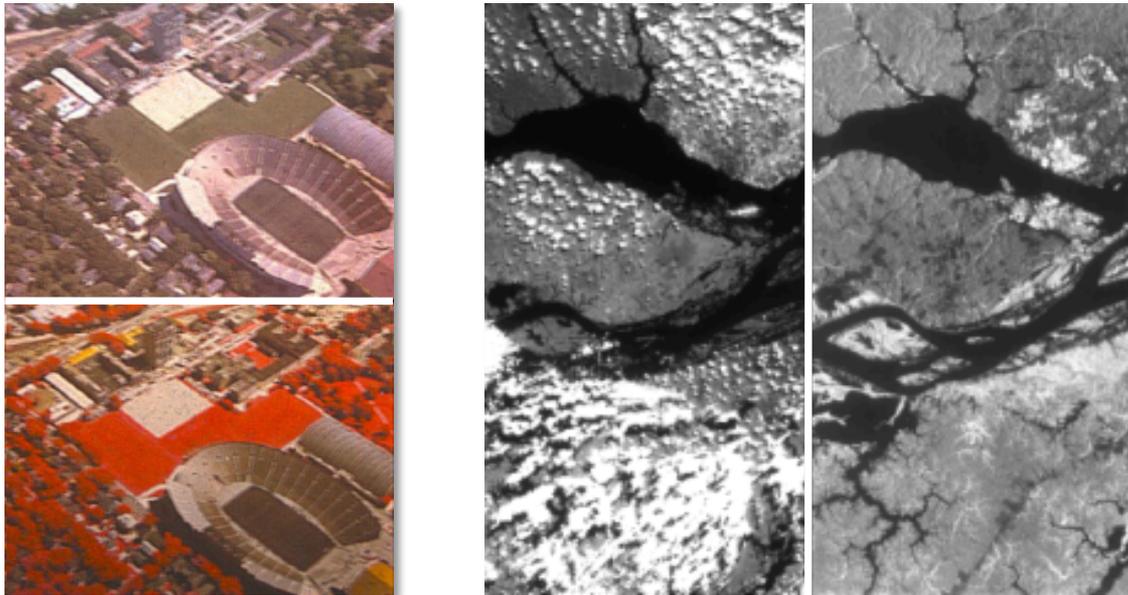
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

**TELEDETECCIÓN.-**

**PRINCIPALES VENTAJAS.-**

**CAPTURA DE REGIONES NO VISIBLES DEL ESPECTRO.-**



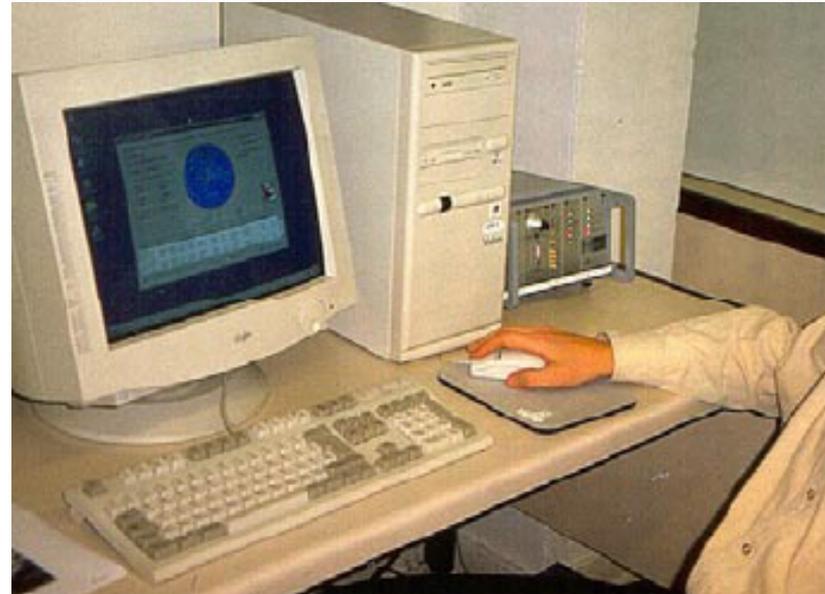
## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

**TELEDETECCIÓN.-**

**PRINCIPALES VENTAJAS.-**

**FORMATO DIGITAL.-**



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### PRINCIPALES INCONVENIENTES.-

- Calibración (medidas absolutas).
- Cobertura nubosa en algunos sistemas.
- Frecuencia de adquisición.
- Resolución espacial.
- Resolución espectral.
- Visión estereoscópica.

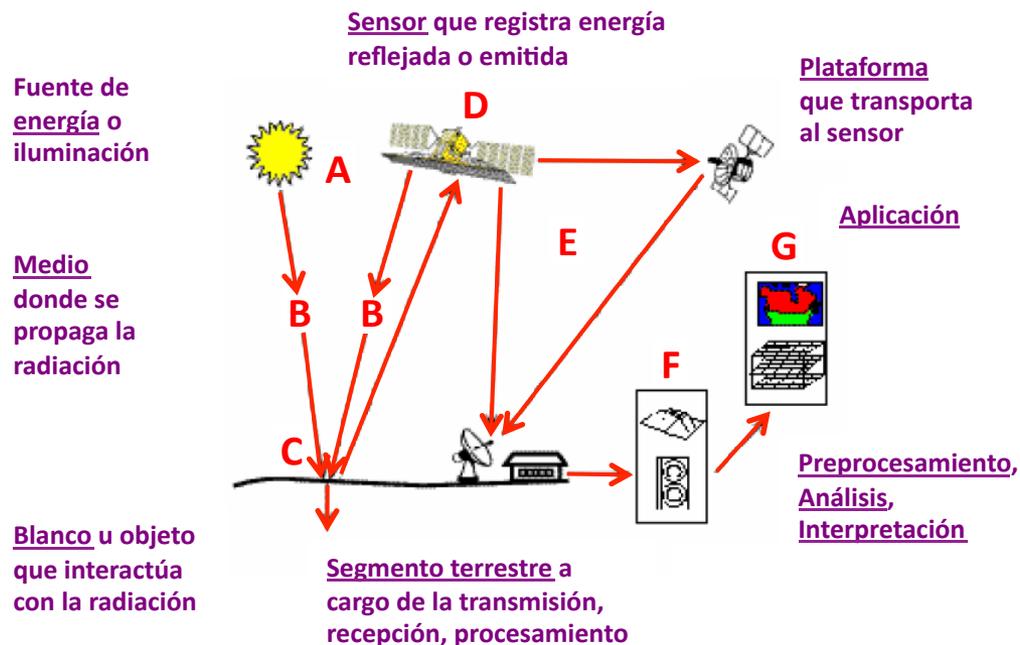
# 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

## 3.2. Métodos indirectos

### TELEDETECCIÓN.-

### FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN.-

### DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO.-



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

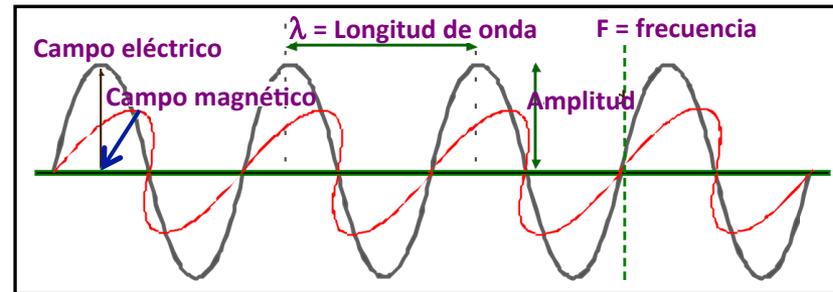
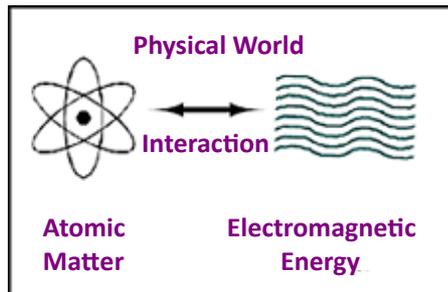
### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN.-

#### PROPIEDADES DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.-

- **TEORÍA ONDULATORIA.** Aquella que concibe la radiación como un haz ondulatorio, según esta teoría la energía se transmite siguiendo un modelo armónico y continuo a la velocidad de propagación de la radiación electromagnética.
- **TEORÍA CUÁNTICA.** Aquella que concibe la radiación como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos con masa igual a cero.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

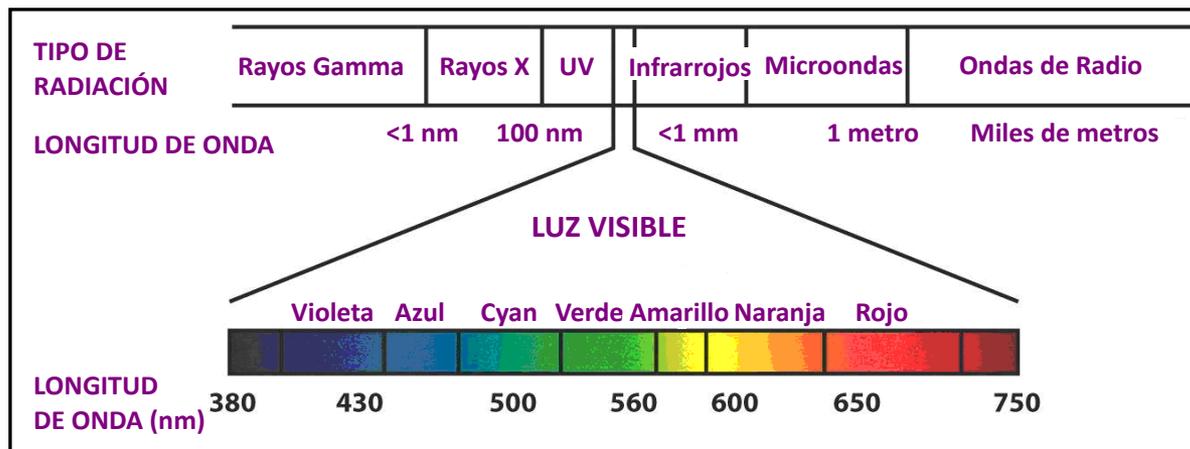
### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN.-

#### ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.-

- Se define **ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO** a la organización por bandas en función de la longitud de onda de toda la radiación electromagnética en las cuáles el comportamiento es muy similar.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN.-

##### TÉRMINOS Y UNIDADES.-

- **ENERGÍA RADIANTE.** Total de la energía radiada en todas las direcciones (Julios).
- **FLUJO RADIANTE.** Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo (Watios).
- **EMITANCIA.** Total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo (Watios/m<sup>2</sup>).
- **IRRADIANCIA.** Total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo (Watios).
- **INTESIDAD RADIANTE.** Total de energía radiada por unidad de tiempo y ángulo sólido (Watios/estéreo radian).

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

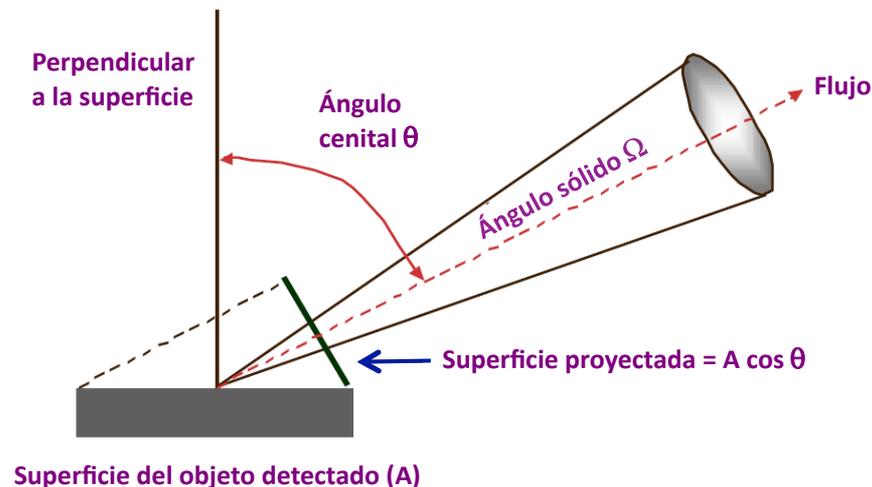
### 3.2. Métodos indirectos

TELEDETECCIÓN.-

FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN.-

TÉRMINOS Y UNIDADES.-

- **ÁNGULO SÓLIDO.** Es un ángulo tridimensional, que se refiere a una sección completa de la energía transmitida, se mide en estéreo radianes.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN.-

##### TÉRMINOS Y UNIDADES.-

- **RADIANCIA.** Total de la energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida, precisamente es lo que mide el sensor (Wattios/m<sup>2</sup> estéreo radian).
- **EMISIVIDAD.** Relación entre la emitancia de una superficie y la emitida por un emisor perfecto, denominado cuerpo negro a la misma temperatura.
- **REFLECTIVIDAD.** Relación ente el flujo incidente y el reflejado por una superficie.
- **ABSORTIVIDAD.** Relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie.
- **TRANSMISIVIDAD.** Relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

# 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

## 3.2. Métodos indirectos

### TELEDETECCIÓN.-

### FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN.-

#### LEYES Y PRINCIPIOS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.-

- **LEY DE PLANCK.** Establece la relación entre el flujo de energía y la longitud de onda de la propia radiación electromagnética.

$$M_{n,\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[ \exp \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot K \cdot T} - 1 \right]}$$

$M_{n,\lambda}$  = Emisividad

$K$  = Constante BOLTZMANN =  $1,38 \cdot 10^{-23}$

$c$  = Velocidad propagación luz

$T$  = Temperatura (° K)

- La fórmula de Planck demuestra que cualquier objeto por encima del cero absoluto (-273 °K) radia energía y ésta aumenta con la temperatura.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN.-

#### LEYES Y PRINCIPIOS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.-

- **LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN.** Permite establecer a partir de la fórmula de Planck, la longitud de onda a la que se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro, sabiendo su temperatura.

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \cdot \mu \cdot m \cdot K$$

- **LEY DE STEFAN-BOLTZMAN.** La fórmula permite calcular el total de energía que un cuerpo negro radia para todas las longitudes de onda por unidad de superficie.

$$M_n = \sigma \cdot T^4$$

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN.-

#### LEYES Y PRINCIPIOS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.-

- El flujo incidente sobre una superficie es reflejado, transmitido o absorbido.
- Los principales tipos de comportamiento reflectivo son:
  - **ESPECULAR:** refleja la energía con el mismo ángulo del flujo incidente.
  - **LAMBERTIANA:** reflejan la energía recibida en todas las direcciones por igual.
- **SIGNATURA ESPECTRAL.** Comportamiento espectral tipo, que permite conocer a través de la reflectividad espectral y sus curvas habituales, la tipología de la cobertura objeto.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### CLASIFICACIÓN PREVIA DE LOS SENSORES.-

- **DEPENDIENDO DEL PROCEDIMIENTO PARA RECIBIR ENERGÍA:**
  - **ACTIVOS:** emiten su propio haz de energía y reciben lo que es reflejado por el cuerpo objeto de estudio.
  - **PASIVOS:** sólo reciben energía emitida en un foco exterior.
  
- **DEPENDIENDO DEL PROCEDIMIENTO PARA GRABAR DATOS:**
  - **SENSORES FOTOGRÁFICOS:** se basan en las mismas teorías que la fotogrametría convencional.
  - **ÓPTICO-ELECTRÓNICOS:** son los clásicos equipos de barrido o escáneres.
  - **ANTENA:** son los radiómetros de microondas en radio difusión.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### RESOLUCIÓN DE UN SISTEMA SENSOR.-

Se define **RESOLUCIÓN** de un sistema sensor, como la habilidad para discriminar información de detalle sobre la superficie objeto. La Resolución tiene las siguientes componentes:

- **RESOLUCIÓN ESPACIAL.** Este término designa el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen, en función de su tamaño.

#### Factores influyentes:

- Altura orbital.
- Velocidad de exploración.
- Número de detectores.



1000 x 1000 meters  
4 meter resolution.



500 x 500 meters  
2 meter resolution.



250 x 250 meters  
1 meter resolution.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

##### RESOLUCIÓN DE UN SISTEMA SENSOR.-

- **RESOLUCIÓN ESPECTRAL.** Este término designa el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen, en función de su tamaño.  
Este término indica el número y anchura de las bandas espectrales que el sensor es capaz de discriminar.  
La elección del número y anchura de las bandas que incluye un sensor esta estrechamente ligado con los objetivos para los que se diseña.  
Un sensor es mejor cuanto mayor sea el número de bandas que proporciona.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### RESOLUCIÓN DE UN SISTEMA SENSOR.-

- **RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA.** Este término indica la capacidad para detectar variaciones en la Radiación Espectral que recibe:
  - **Sistemas fotográficos:** nivel de grises recogido en la película.
  - **Óptico-electrónicos:** rango de valores que codifica el sensor, se expresa en BITS.

11 bits: 2048



8 bits: 256



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

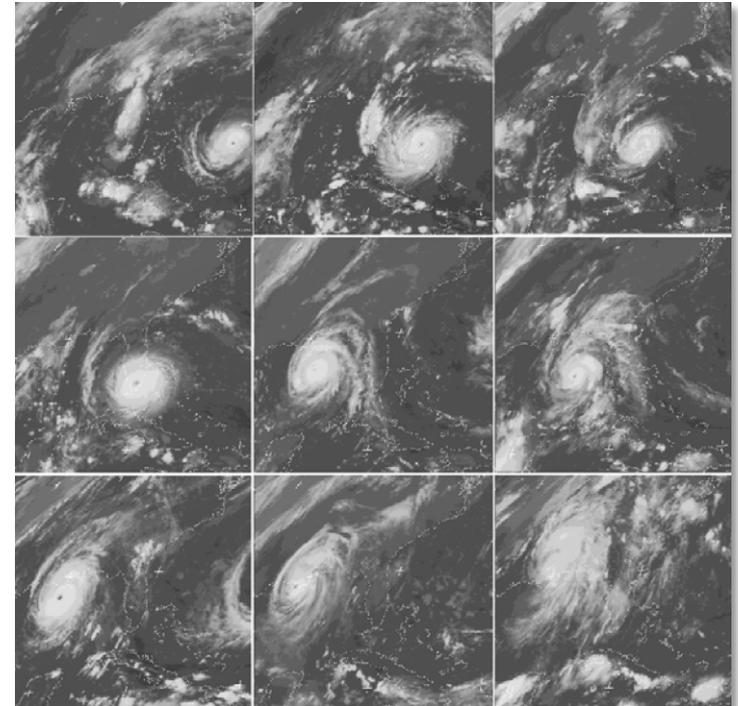
#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### RESOLUCIÓN DE UN SISTEMA SENSOR.-

- **RESOLUCIÓN TEMPORAL.** Este término indica la periodicidad con la que se adquieren imágenes de la misma zona de la superficie terrestre.

La Resolución Temporal es función de:

- Características de la plataforma.
- Diseño del sensor.
- Ángulo total de cobertura.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

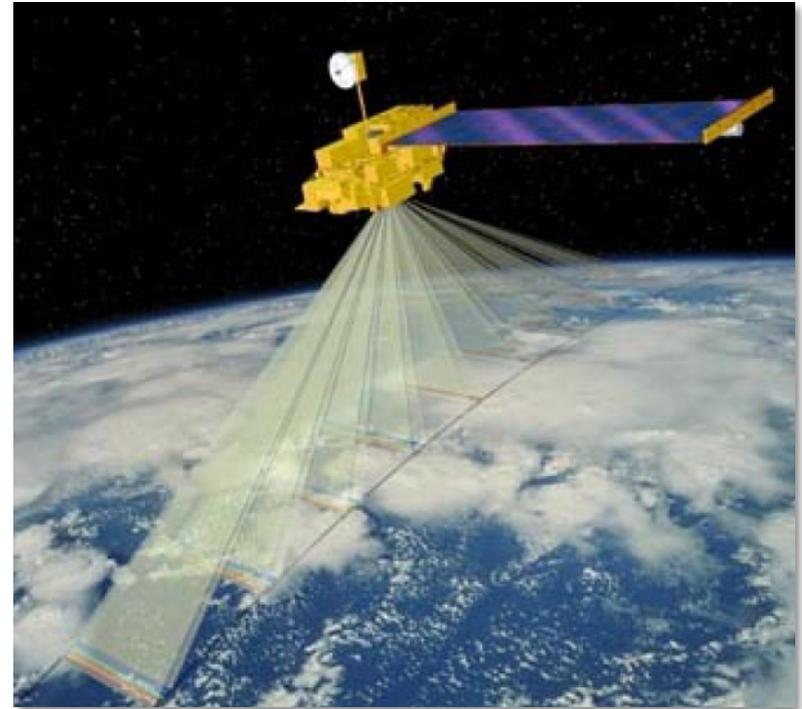
#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### RESOLUCIÓN DE UN SISTEMA SENSOR.-

- **RESOLUCIÓN ANGULAR.** Este término indica la capacidad de un sensor para observar la misma zona de la superficie terrestre desde lugares diferentes del propio sensor.

La Resolución Temporal es función de:

- Características de la plataforma.
- Diseño del sensor.
- Ángulo total de cobertura.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### SENSORES PASIVOS.-

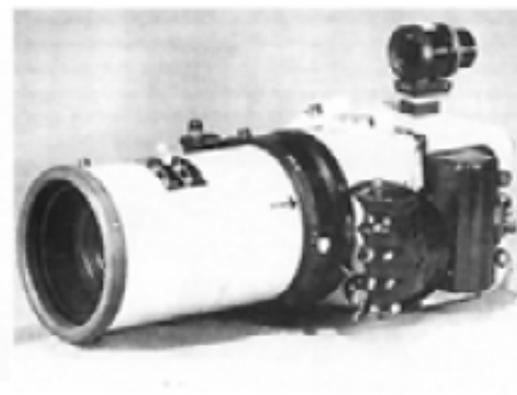
- **CÁMARAS FOTOGRÁFICAS.** Sigue siendo el medio más utilizado en teledetección aérea, pero con una importancia muy limitada en sensores espaciales, al estar restringida la adquisición a la carga de película que puede incluirse en el satélite.



Cámara Multibanda MKF-6.



Cámaras a bordo del Space Shuttle (Short & Robinson, 1997).



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

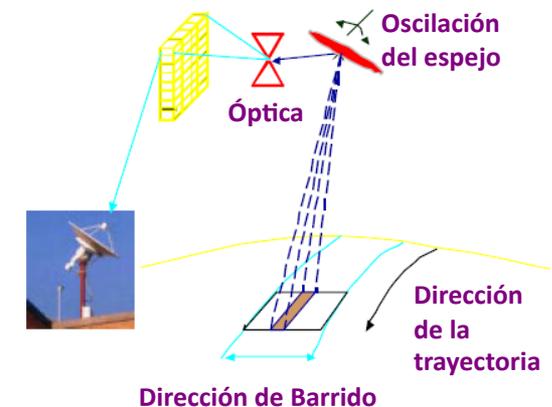
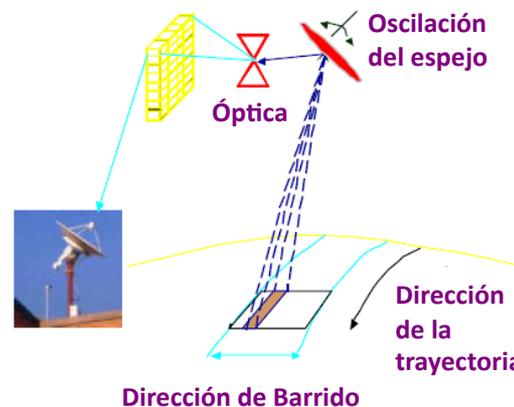
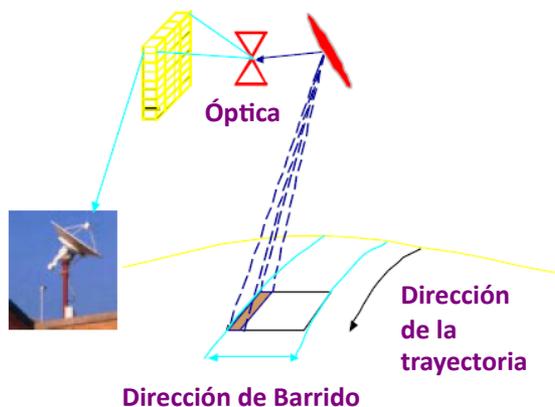
### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### SENSORES PASIVOS.-

- **EXPLORADOR DE BARRIDO.** Un espejo móvil oscila de forma perpendicular a la dirección de la trayectoria, capta la Radiancia enviándola a unos detectores que la amplifican y la convierten en una señal eléctrica, transformándola a su vez en un valor numérico que puede almacenarse o transmitirla a la red de antenas receptoras.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### SENSORES PASIVOS.-

- **EXPLORADOR DE BARRIDO:**

- Son los más habituales en teledetección espacial.
- El número y características de los detectores que incorpora un equipo de barrido es muy importante para explicar las condiciones de la imagen, su principal inconveniente suele ser la Resolución Espacial.
- Las principales ventajas que proporciona este tipo de sensor son:
  - Muy fáciles de calibrar y corregir radiométricamente.
  - Posibilidad de realizar coberturas sistemáticas.
  - Grabación digital de la información.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

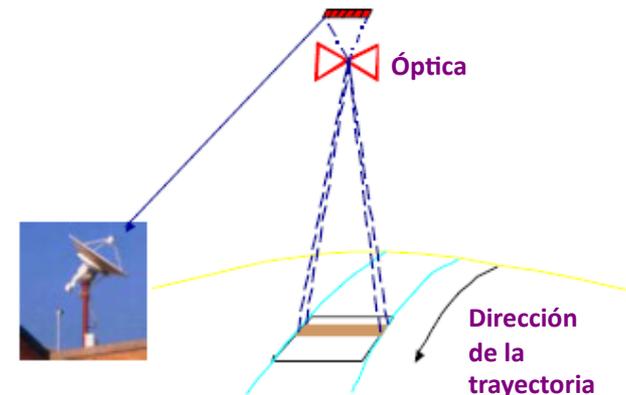
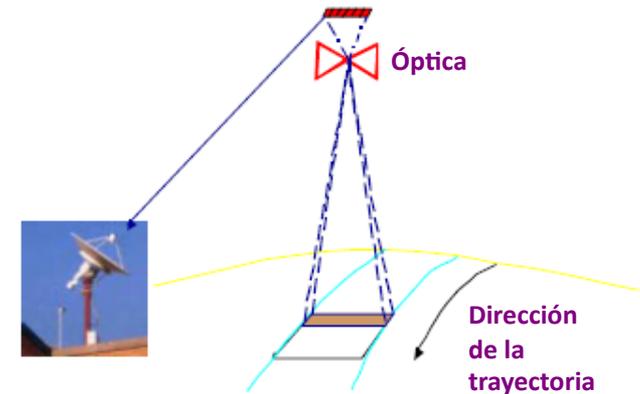
#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### SENSORES PASIVOS.-

#### • EXPLORADOR DE EMPUJE:

- En éstos equipos se elimina el espejo oscilante, gracias a que disponen de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor.
- Estos detectores se van excitando con el movimiento orbital del satélite de forma que exploran en cada momento una línea completa, desplazándose ésta de forma simultánea con la plataforma.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### SENSORES PASIVOS.-

- **EXPLORADOR DE EMPUJE:**

- Esta tecnología permite aumentar la Resolución Espacial respecto a los barredores convencionales.
- Como contrapartida tienen la desventaja de ser más difíciles de calibrar.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### SENSORES PASIVOS.-

#### • CÁMARAS DE VÍDEO:

- La imagen es enfocada sobre un foto-conductor, construyéndose una réplica de la imagen original, que se mantiene en esa superficie hasta que el haz de electrones la barre de nuevo, restaurando así su equilibrio.
- Más reciente resulta el empleo de cámaras de vídeo digital, como fuente de imágenes en proyectos de gran escala, su principal inconveniente en la actualidad es la resolución espacial.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### SENSORES PASIVOS.-

- **RADIÓMETRO DE MICROONDAS:**

- Se trata de un sensor que opera en el rango de espectro con longitudes de onda milimétricas por lo que no se ve afectado por la situación atmosférica o condiciones de iluminación.
- Esta formado por un elemento direccional, un receptor que permite la detección y amplificación de las microondas.
- Su gran desventaja es la pobre resolución espacial.

# 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

## 3.2. Métodos indirectos

### TELEDETECCIÓN.-

### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### SENSORES PASIVOS.-

- **RADAR:**

- El *RADAR* es un radiómetro activo de microondas, que trabaja en una banda comprendida entre 1-10 mm., en el que cada “*pixel*” representa el coeficiente de retro-dispersión de esa área sobre el terreno.
- El principal problema de éstos sensores es la baja resolución como consecuencia del escaso diámetro de la antena. La resolución espacial se puede calcular mediante la expresión:

$$R = \frac{\lambda \cdot h}{\Phi}$$

$R$  = Resolución

$h$  = Altura \_Plataforma

$\lambda$  = Longitud \_Onda

$\Phi$  = Diámetro \_Apertura

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### SENSORES Y SATÉLITES.-

#### SENSORES PASIVOS.-

- **RADAR:**

- Debido a que observan la superficie lateralmente, las variaciones en los ángulos de emisión e incidencia del flujo implican notables deformaciones geométricas.
- En la geometría de adquisición de imágenes, el radar tiene una gran influencia al relieve que modifica el ángulo local de incidencia.
- Pese a sus problemas, es el sensor que más se ha desarrollado debido a su gran versatilidad de observación, ya que es independiente de situación atmosférica e iluminación solar.

## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

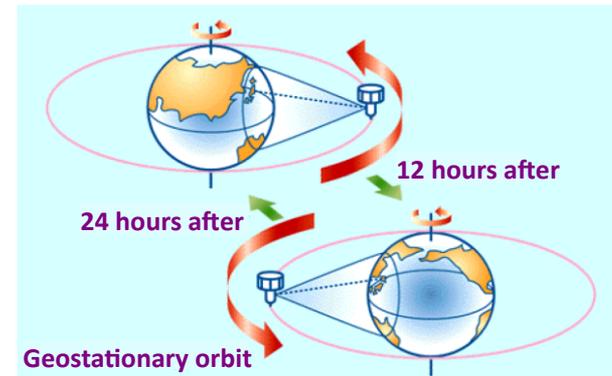
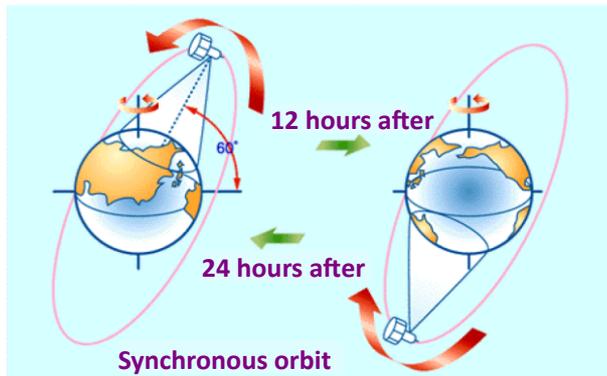
### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN.-

#### CLASIFICACIÓN DE LAS PLATAFORMAS.-

- **GEOESTACIONARIAS.** Están colocadas en orbitas muy alejadas, lo que permite sincronizarse al movimiento de rotación de la tierra y observar siempre la misma zona.
- **MÓVILES.** Observan sistemáticamente distintas zonas del planeta, habitualmente tienen orbitas circulares.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN.-

#### PROGRAMA LANDSAT (USA).-

- **Lanzamientos:** 1972, 1975, 1978, 1982, 1984 (fallido en 1993) y 1999.
- **Órbita heliosíncrona:** altura 917 km (1-3); 705 km (4-5-7).
- **Ciclo:** 18 días (1-3); 16 días (4-5-7).

#### Aspecto de los satélites Landsat



Figura A. Landsat 1-3  
(Short & Robinson, 1997).

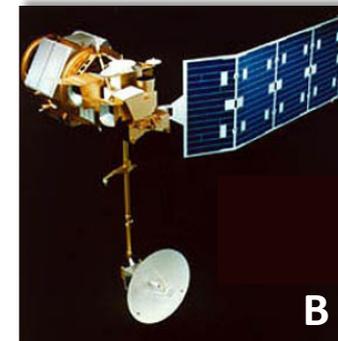
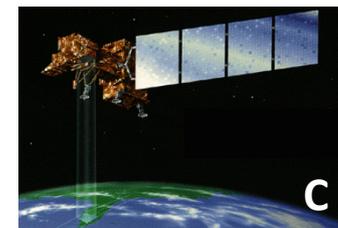


Figura B. Landsat 4 y 5 (NASA).  
Figura C. Landsat 7 (NASA).



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

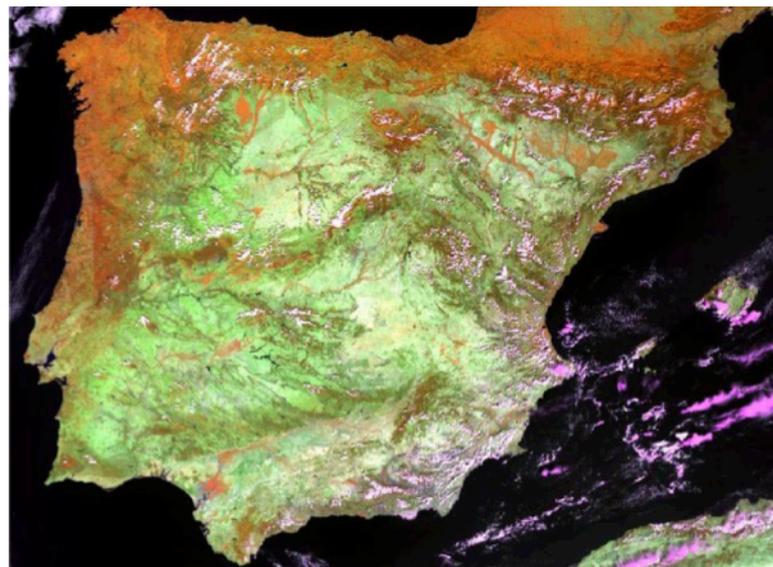
#### TELEDETECCIÓN.-

#### PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN.-

#### PROGRAMA SPOT (Francia, Bélgica y Suecia).-

- Iniciativa Franco-Belga-Sueca.
- **Lanzamientos:** 1986, 1990, 1993, 1998.
- **Novedades técnicas:**
  - Permite cambiar el ángulo de observación.
  - Incorpora sensor de exploración CCD.
- **Sensores:**
  - HRV (mejorado en 1998 con SWIR).
  - Vegetación (SPOT-4).

Imagen del 8 de septiembre de 1999.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN.-

##### PROGRAMA IRIS (India).-

- IRS-1C lanzado el 28 de diciembre de 1995 por un cohete ruso. Comenzó a funcionar en diciembre de 1996.
- IRS-1D lanzado el 29 de septiembre de 1997 por un cohete PSLV.
- Comenzó a funcionar en octubre de 1997.
- Órbita: 907 km, heliosíncrona, 10,30 a.m., 24 días.

París



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN.-

##### SATÉLITES COMERCIALES (Alta resolución IKONOS).-

- Lanzamiento en septiembre de 1999.
- Disponibilidad comercial de imágenes desde enero de 2000.
- **Tamaño:** 1,8 x 1,6 m.
- **Peso:** 817 kg.
- **Memoria a bordo:** 64 Gb.
- **Órbita:** 681 km, heliosíncrona; 14 órbitas al día a 7 km/seg.
- **Vida útil prevista:** 7 años, MMD 5+ años.



## 3. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN FUNDAMENTAL

### 3.2. Métodos indirectos

#### TELEDETECCIÓN.-

#### PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN.-

#### SATÉLITES COMERCIALES (Alta resolución IKONOS).-

- **Datos de la cámara:**
  - Óptica de alta precisión desarrollada por Kodak.
  - Adquisición simultánea pancromática y multiespectral.
  - Longitud focal: 10 m / f14.3.
  - Óptica de 3 espejos anastigmática.
  - Peso: 170 kg.



1-Metro  
Pancromático.



1-Metro  
"Pan-Sharpened".



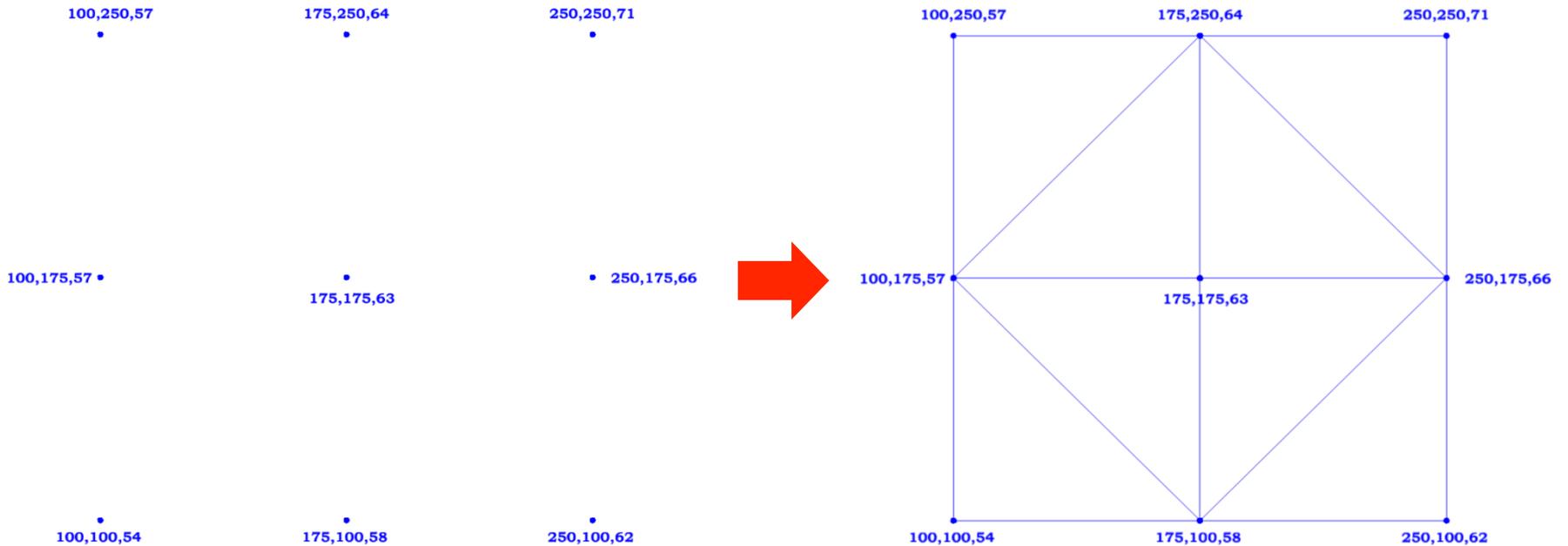
4-Metros  
Multiespectral.



# 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

## INTRODUCCIÓN.-

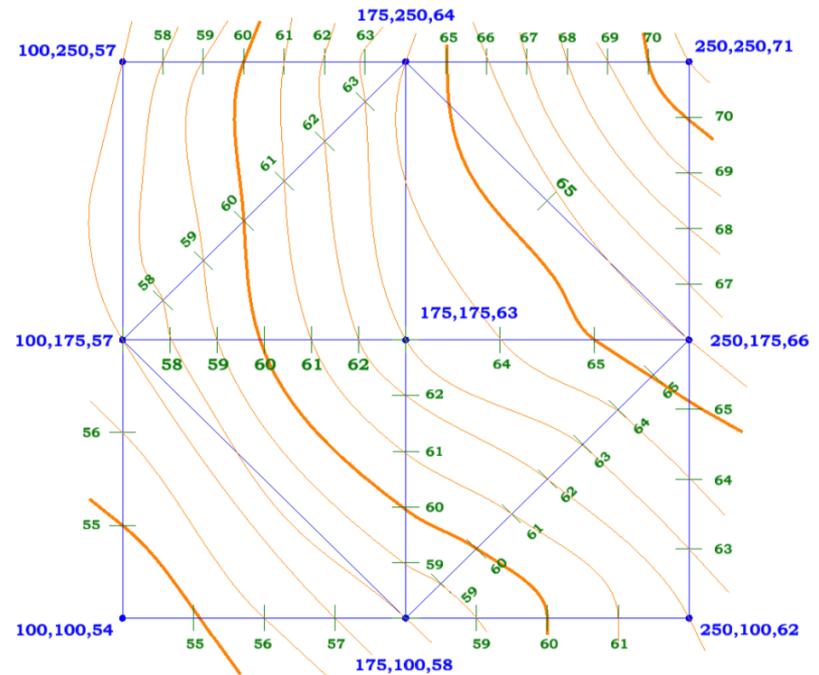
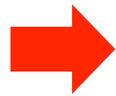
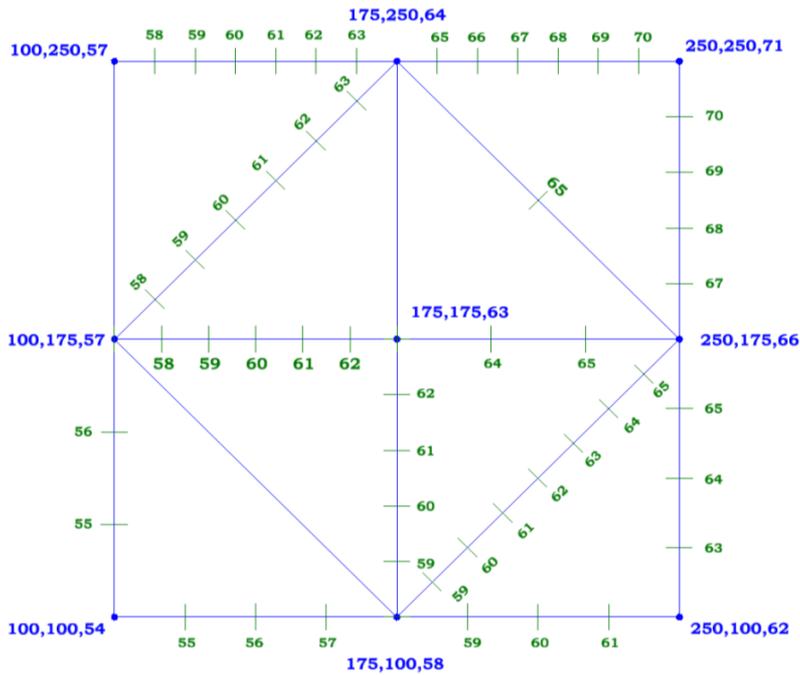
## GENERACIÓN DE CURVAS DE NIVEL, TÉCNICA CLÁSICA.-



# 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

INTRODUCCIÓN.-

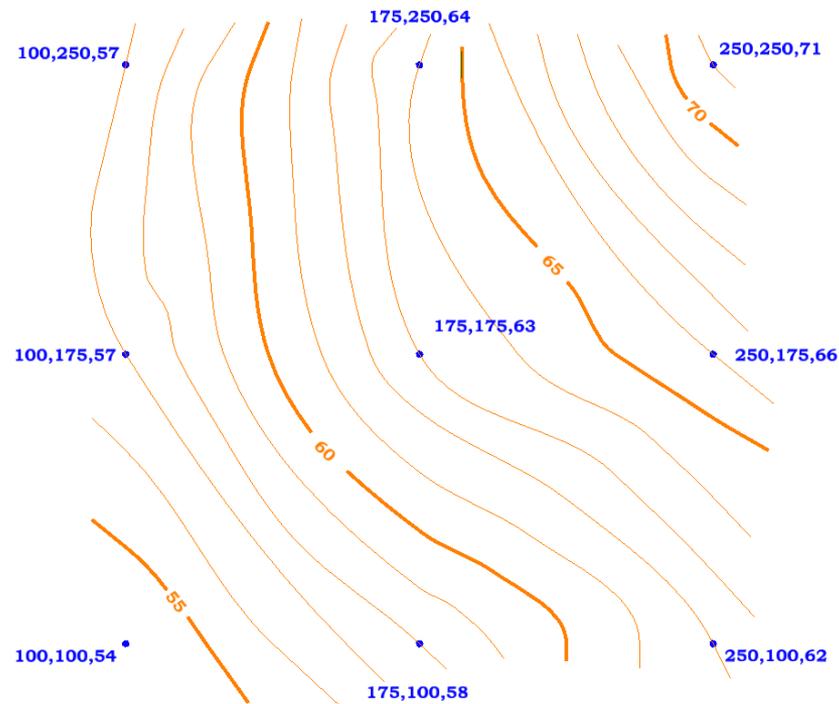
GENERACIÓN DE CURVAS DE NIVEL, TÉCNICA CLÁSICA.-



# 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

**INTRODUCCIÓN.-**

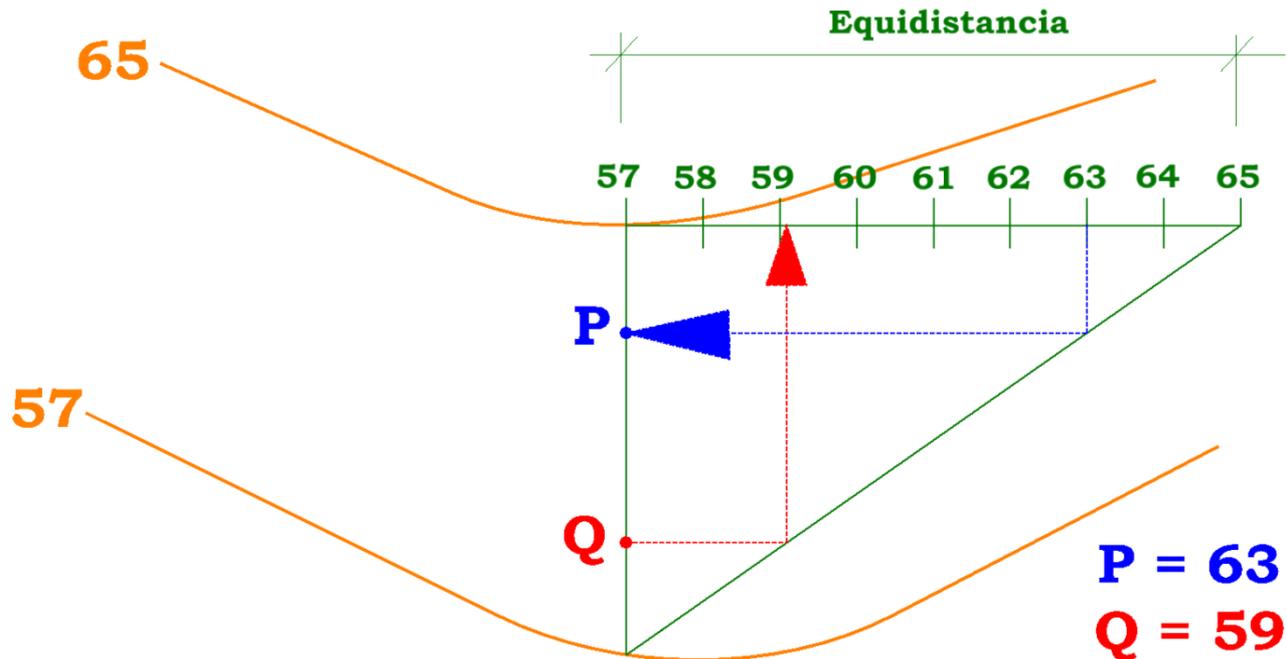
**GENERACIÓN DE CURVAS DE NIVEL, TÉCNICA CLÁSICA.-**



# 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

INTRODUCCIÓN.-

INTERPOLACIÓN, TÉCNICA CLÁSICA.-



## 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

### INTRODUCCIÓN.-

### INTERPOLACIÓN DIGITAL.-

- El proceso de interpolación o estimación de la altura de un punto de la nube de puntos, en formato digital requiere el siguiente proceso:
  1. Fijar la posición del punto por sus coordenadas.
  2. Definir un entorno del punto cuestión.
  3. Extraer el conjunto de datos del MDT vectorial que está incluido en el contorno.
  4. Realizar la interpolación.
  5. Asignar la cota resultante al punto.
- Los métodos utilizados para interpolar un valor a partir de un conjunto de puntos distribuidos irregularmente pueden reducirse a tres: ponderación en función inversa de la distancia, superficies de tendencia y “kriging”.

## 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

### 4.1. Función inversa de la distancia

#### FUNDAMENTO DE LA INTERPOLACIÓN.-

- Se asignan pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa del punto problema según la expresión:

$$Z_k = Z_{X,Y}^{INT} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \cdot \frac{1}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k}}$$

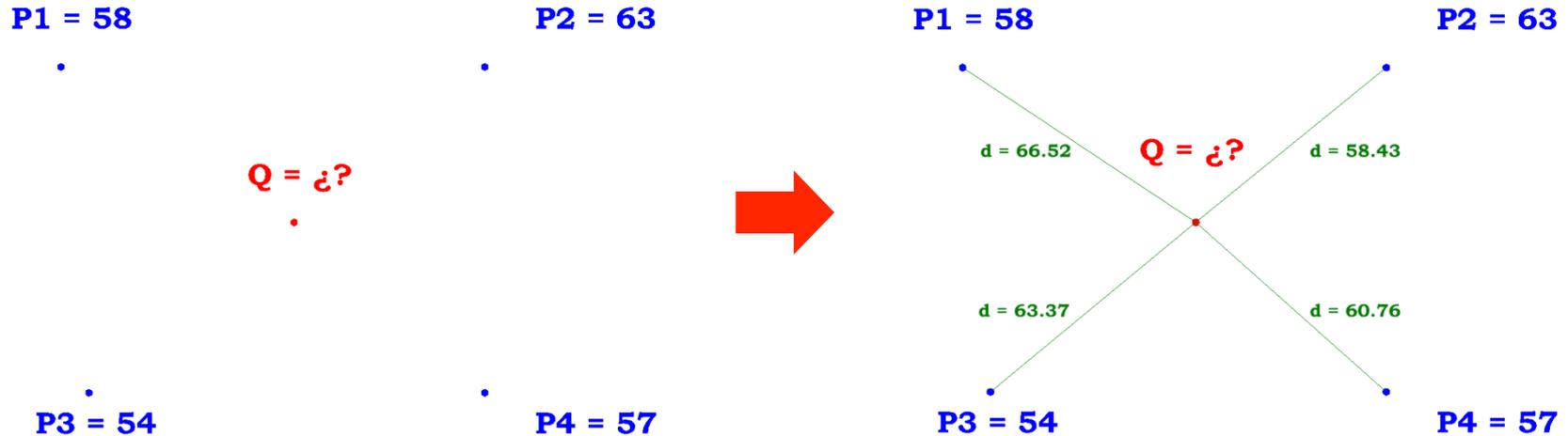
$\left\{ \begin{array}{l} Z_k : \text{es el valor de la cota en el punto } k. \\ n : \text{es el número de puntos del entorno seleccionado.} \\ 1/d_i^k : \text{define el factor de ponderación o peso del punto } i. \end{array} \right.$

- Este método es de cálculo sencillo, pero presenta el problema de que al ser básicamente una media ponderada el valor estimado estará comprendido entre los del entorno por lo que el correcto tratamiento de las formas cóncavas y convexas depende de la distribución de los puntos originales.

## 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

### 4.1. Función inversa de la distancia

EJEMPLO DE INTERPOLACIÓN.-



$$Z_k = Z_{X,Y}^{INT} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \cdot \frac{1}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k}} = \frac{\left[ \left( \frac{58}{66,52} \right) + \left( \frac{63}{58,43} \right) + \left( \frac{54}{63,37} \right) + \left( \frac{57}{60,76} \right) \right]}{\left[ \left( \frac{1}{66,52} \right) + \left( \frac{1}{58,43} \right) + \left( \frac{1}{63,37} \right) + \left( \frac{1}{60,76} \right) \right]} = 58,0$$

## 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

### 4.2. Estimación de superficies de tendencia

#### FUNDAMENTO DE LA INTERPOLACIÓN.-

- Partiendo de los puntos origen del entorno, se define una superficie ajustada normalmente por mínimos cuadrados. La ecuación general se corresponde con la expresión:

$$Z_{X,Y}^{INT} = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^{k-1} a_{ij} x^i y^j$$

- El grado de la ecuación de superficie aumenta el tiempo de cálculo, recomendándose ecuaciones de grado 5:

**Primer Orden:**  $Z_E = A + Bx + Cy$

**Segundo Orden:**  $Z_E = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2$

**Tercer Orden:**  $Z_E = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3$

**Cuarto Orden:**  $Z_E = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4$

## 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

### 4.2. Estimación de superficies de tendencia

#### FUNDAMENTO DE LA INTERPOLACIÓN.-

- La opción de mínima complejidad implica elegir el valor de k para el cual la suma de desviaciones entre los datos reales y estimados sea menor que un valor prefijado:

$$\sum_{X,Y} \left( Z_{X,Y}^{INT} - Z_{X,Y}^{REAL} \right)^2 < E_{\text{máx.}}$$

- El uso de superficies de tendencia puede verse penalizado por dos factores significativos:
  - El primero afecta al número de datos, que debe de ser suficiente para llevar a cabo un análisis estadísticamente significativo.
  - El segundo implica que el uso de extrapolaciones puede dar lugar a valores disparatados, especialmente para ecuaciones de grado elevado.

## 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

### 4.3. Estimación según el modelo de Kriging

#### FUNDAMENTO DE LA INTERPOLACIÓN.-

- La opción de mínima complejidad implica elegir el valor de  $k$  para el cual la suma de desviaciones entre los datos reales y estimados sea menor que un valor prefijado:

$$Z_{X,Y}^{INT} = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot Z_i$$

- La peculiaridad del método reside en la forma en que se asignan los pesos, pudiéndose completar con la definición estadística del entorno considerado para el punto del que se desea conocer la cota. La formulación básica del kriging asume que la variación espacial de la variable a representar, la cota, puede ser representada como la suma de tres componentes.

## 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

### 4.3. Estimación según el modelo de Kriging

#### FUNDAMENTO DE LA INTERPOLACIÓN.-

- El primer componente puede considerarse que tiene un valor medio constante o asociarse a una superficie de tendencia, según la expresión:

$$Z_{X,Y}^1 = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^{k-1} a_{ij} x^i y^j$$

- El segundo componente aparece al no poder explicar las superficies de tendencia la totalidad de la variación de los datos, representando los residuos como una variable aleatoria, cuya distribución puede ser explicada en términos de correlación espacial:

$$Z_{X,Y}^2 = Z_{X,Y}^1 - Z_{X,Y}^{REAL}$$

- El tercer componente representa un valor residual de error aleatorio y no correlacionado espacialmente.

## 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

### 4.3. Estimación según el modelo de Kriging

#### FUNDAMENTO DE LA INTERPOLACIÓN.-

- El primer componente puede considerarse que tiene un valor medio constante o asociarse a una superficie de tendencia, según la expresión:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var} (Z_p - Z_{p+h})$$

Donde:

var : representa la varianza.

$Z_p$  : es el valor de la cota en un punto  $P$ .

$Z_{p+h}$  : define la cota en un punto situado a una distancia  $h$  del anterior.

- La función resultante se denomina variograma y muestra la correlación de los datos en función de la distancia. La expresión para representarla es:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (Z_{p_i} - Z_{p_i+h})^2$$

Donde  $n_h$  es el número de pares de valores separados por una distancia  $h$ .

# 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

## 4.3. Estimación según el modelo de Kriging

### FUNDAMENTO DE LA INTERPOLACIÓN.-

- El paso posterior consiste en el cálculo de las funciones de ponderación o funciones de peso  $\lambda_i$  de forma que no presenten sesgo ( $\sum \lambda_i = 1$ ) y que minimizan la varianza esperada. Para ello se resuelve la ecuación matricial:

$$[\gamma(h_{ij})] \cdot [\lambda_i] = [\gamma(h_{ip})]$$

Donde:

$[\gamma(h_{ij})]$  : es una matriz con los valores de la semivarianza para las distancias existentes entre los puntos ( $i = 1 \dots k; j = 1 \dots k$ ).

$[\lambda_i]$  : es un vector de pesos que contiene las funciones de ponderación para cada punto considerado ( $i = 1 \dots k$ ).

$[\gamma(h_{ip})]$  : es otro vector con los valores de la semivarianza correspondiente a las distancias entre cada uno de los puntos dato ( $i = 1 \dots k$ ) y el punto cuestión  $P$ .

## 4. EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

### 4.3. Estimación según el modelo de Kriging

#### FUNDAMENTO DE LA INTERPOLACIÓN.-

- El *kriging* permite obtener mediante el variograma el valor de la distancia para la cual los datos pueden considerarse independientes entre sí. Además, este valor limita el entorno a considerar alrededor del punto problema. Otro parámetro estimado es el error esperado para cada punto que es función de los valores de la varianza observados para los datos y que se calcula:

$$r_p^2 = \sum_{i=1}^k \lambda_i \gamma(h_{ip})$$

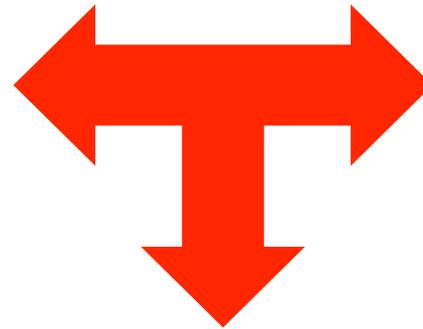
- El *kriging* es un método de estimación estadísticamente óptimo siempre y cuando el variograma tenga validez general para el modelo, es decir, la interdependencia de los datos debe ser función exclusiva de la distancia. Además en la teoría general del *kriging* se asume una estructura isotrópica de los datos de forma que la distancia entre dos puntos puede medirse independientemente de su situación relativa. Su mayor desventaja es la complejidad de los cálculos necesarios para su ejecución.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.1. Introducción

**ÁMBITO DE TRABAJO.-**

**INGENIERÍA**



**VECTORIAL**

**PRECISIÓN**

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### FUNDAMENTO DE LA TRIANGULACIÓN.-

- **Algoritmo DELAUNAY** (matemático ruso, Boris N. Delone):

$$f : A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$$

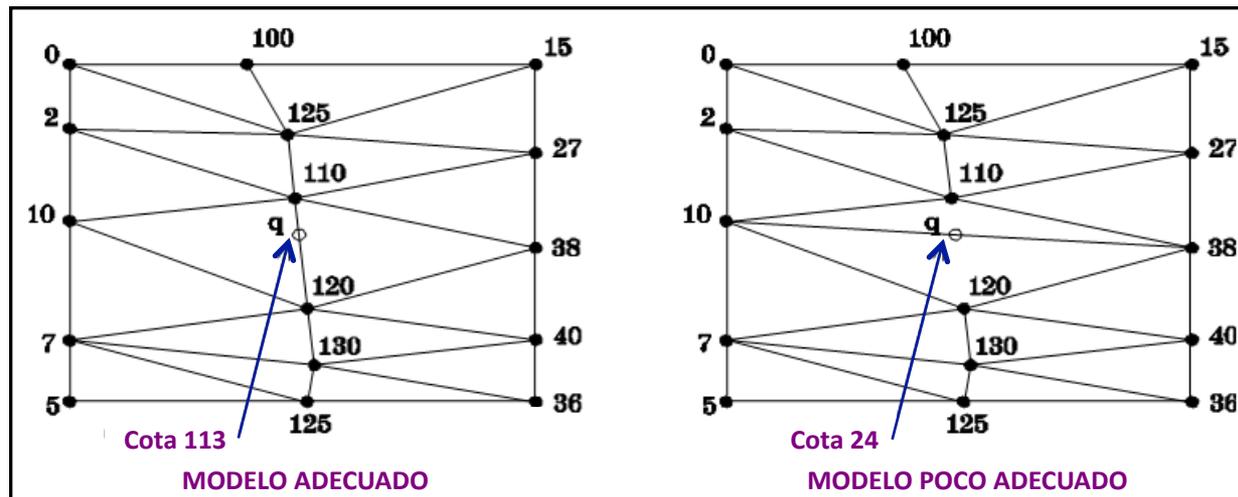
- Se busca una función que asigne cota a todos y cada uno de los puntos de una superficie  $A$ , siendo conocida la función  $f$  en un número finito de puntos, teniendo que aproximarse el valor de la altura al resto del dominio.
- La aproximación al terreno consiste en determinar la triangulación del conjunto de puntos de cota conocida en el plano, para posteriormente añadir la altura a cada uno de los puntos o vértices de los triángulos.

# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

### FUNDAMENTO DE LA TRIANGULACIÓN.-

- En principio puede parecer que todas las triangulaciones son válidas, sin embargo, existen algunas que se asemejan mejor a la forma real del terreno y que se caracterizan por maximizar los ángulos menores, es decir, buscan el criterio de máxima equilateralidad, que es la propuesta por Delaunay.



# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

### TRIANGULACIONES DE UN CONJUNTO DE PUNTOS.-

- Se define como triangulación de un conjunto P de puntos a una subdivisión plana S de modo que si se añade un lado conectando dos puntos intersecta alguno de los lados existentes. La triangulación del conjunto P existe y se caracteriza por la existencia de una envolvente convexa en la que sus lados son, a su vez, lados de triángulos. El número de triángulos será:

$$Triángulos = 2 \cdot n - 2 - k = 2 \cdot (n - 1) - k$$

Donde:

$n$  = número de puntos de P.

$k$  = número de puntos que pertenecen a la envolvente convexa.

- Así mismo, el número de lados será:

$$Lados = 3 \cdot n - 3 - k = 3 \cdot (n - 1) - k$$

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

TRIANGULACIONES DE UN CONJUNTO DE PUNTOS.-

$$\text{Triang} = 2 \cdot (n - 1) - k =$$

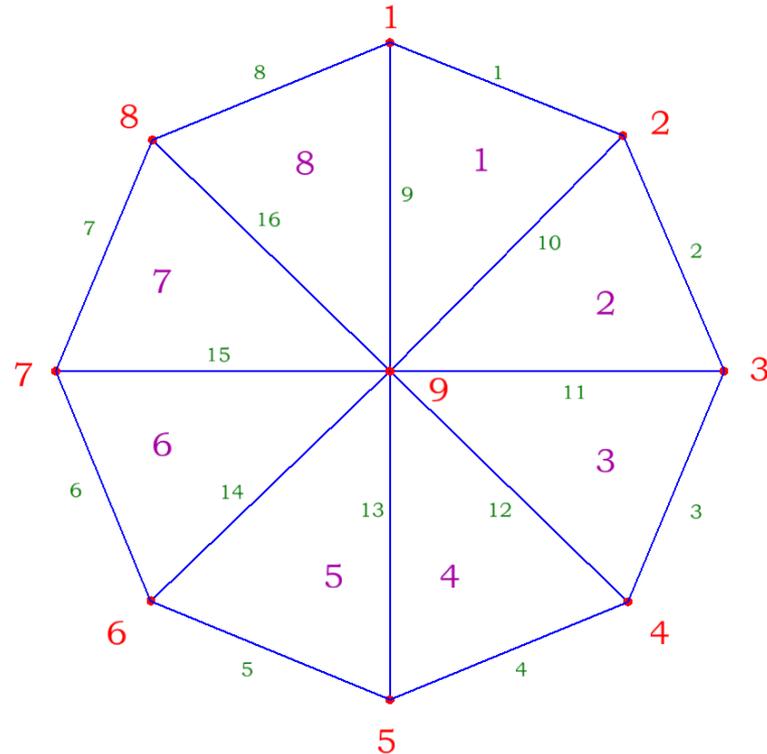
$$\text{Triang} = 2 \cdot (9 - 1) - 8 =$$

8 Triángulos

$$\text{Lados} = 3 \cdot (n - 1) - k =$$

$$\text{Lados} = 3 \cdot (9 - 1) - 8 =$$

16 Lados

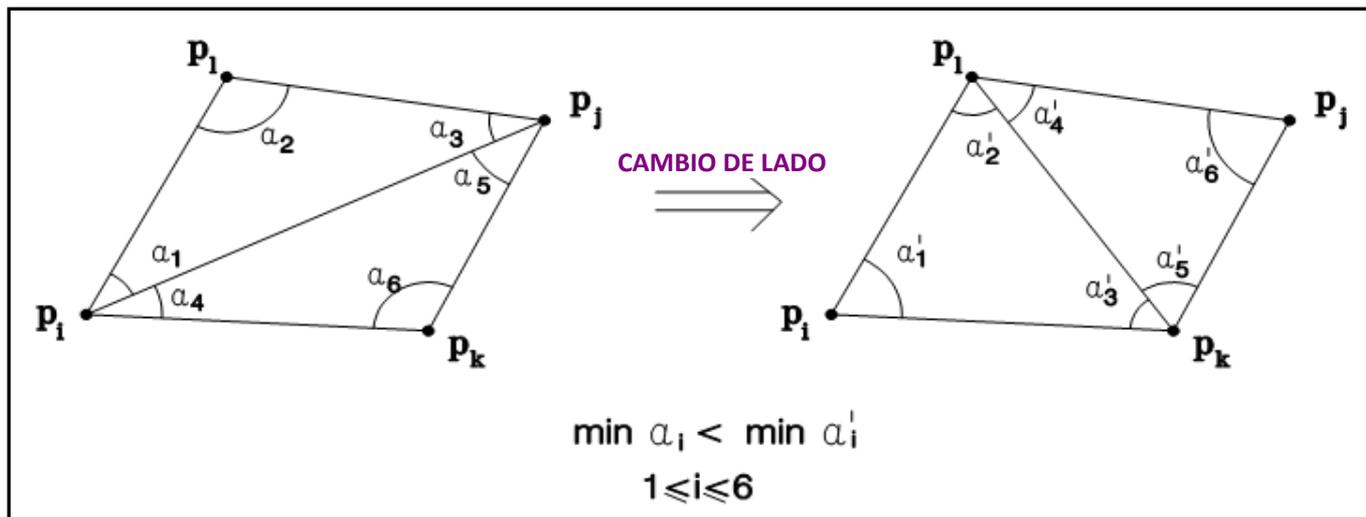


## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### TRIANGULACIONES DE UN CONJUNTO DE PUNTOS.-

- De entre todas las triangulaciones posibles hay una que presenta la máxima equilateridad de los lados de los triángulos. La condición para que se cumpla esta característica es que el ángulo mínimo sea siempre el máximo.

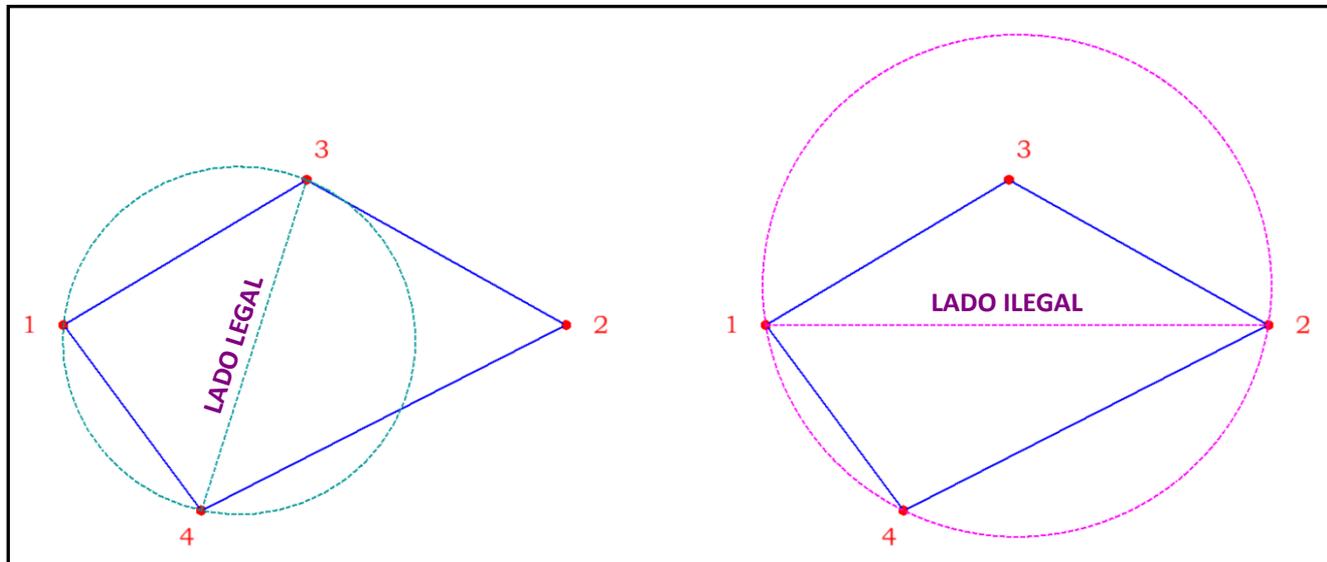


## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### TRIANGULACIONES DE UN CONJUNTO DE PUNTOS.-

- La condición de máxima equilateridad de la triangulación se traduce en que cada triángulo definirá una circunferencia que pasa por sus tres vértices y no contiene ningún otro punto de la triangulación.

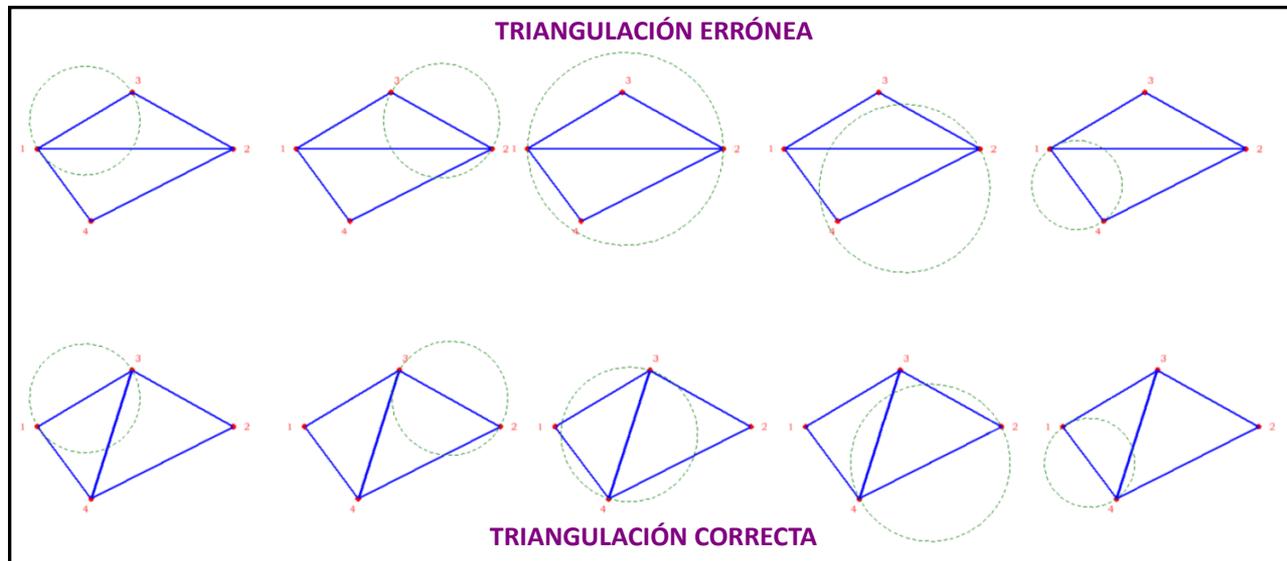


## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### TRIANGULACIONES DE UN CONJUNTO DE PUNTOS.-

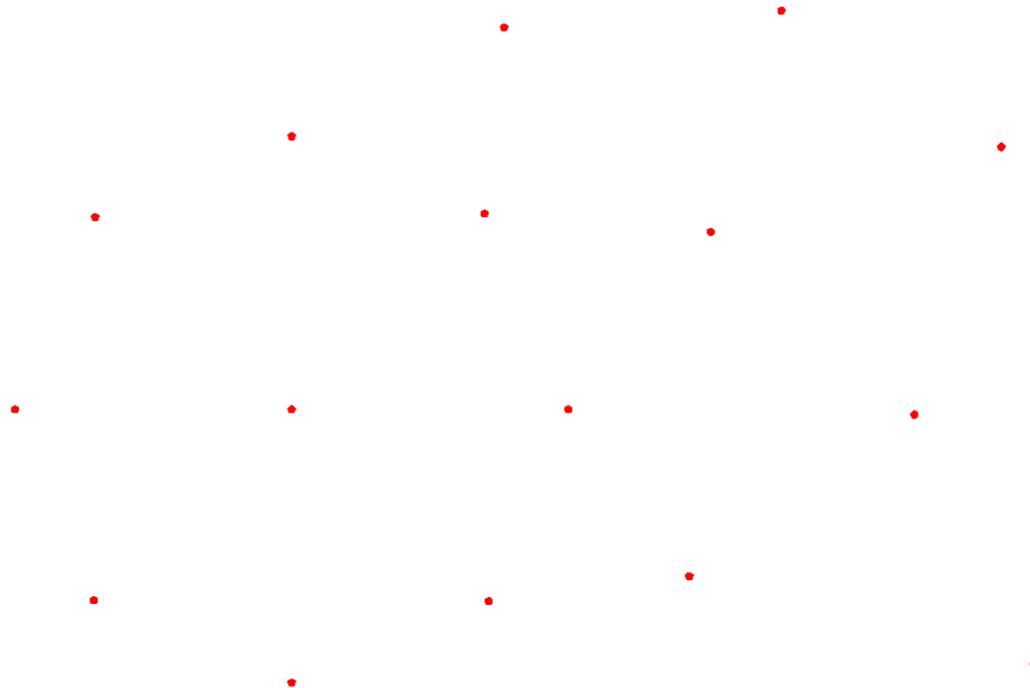
- La condición de máxima equilateridad de la triangulación requiere que la circunferencia que pasa por cada lado de la triangulación no contenga a ningún punto de la propia triangulación.



# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

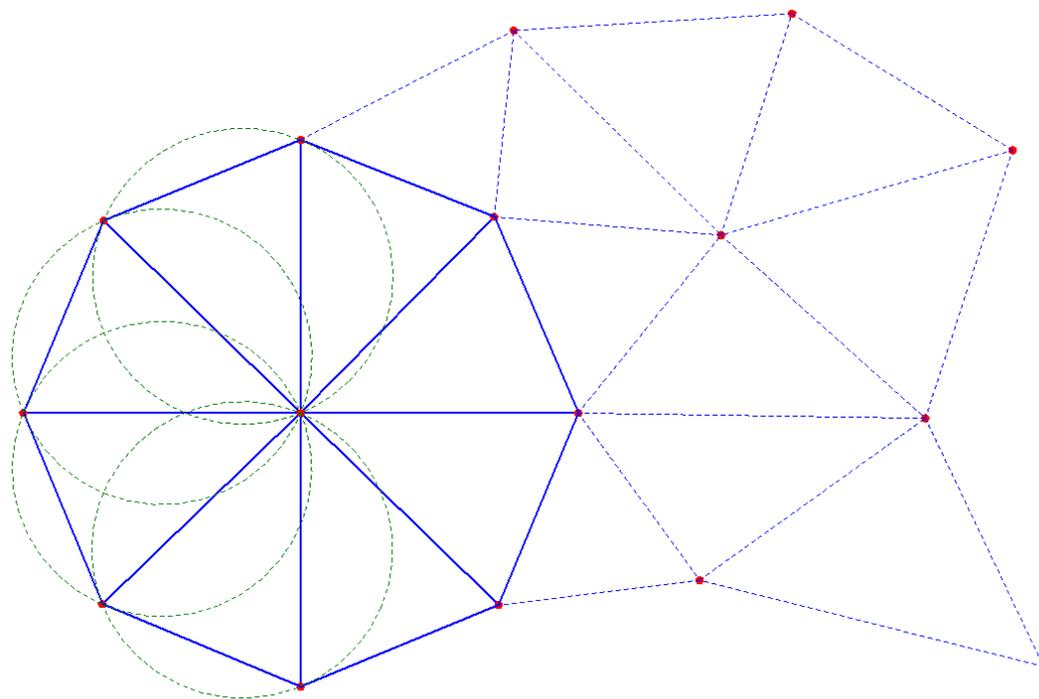
**TRIANGULACIONES DE UN CONJUNTO DE PUNTOS.-**



# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

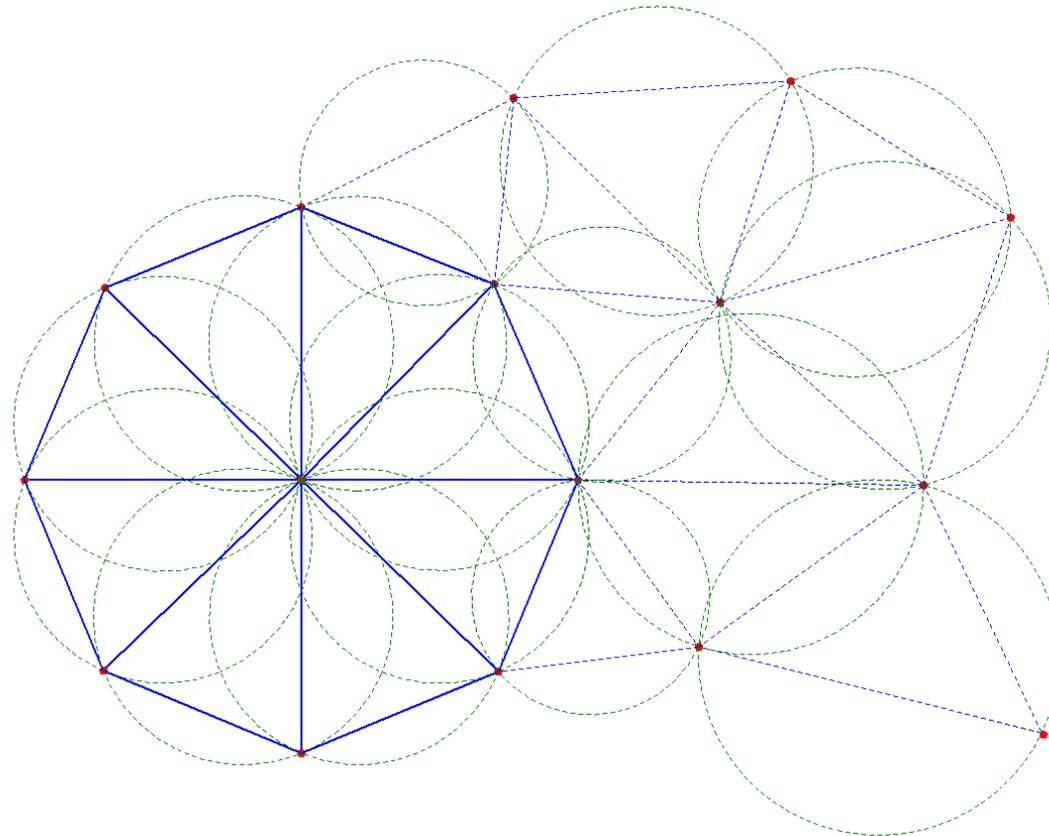
**TRIANGULACIONES DE UN CONJUNTO DE PUNTOS.-**



# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

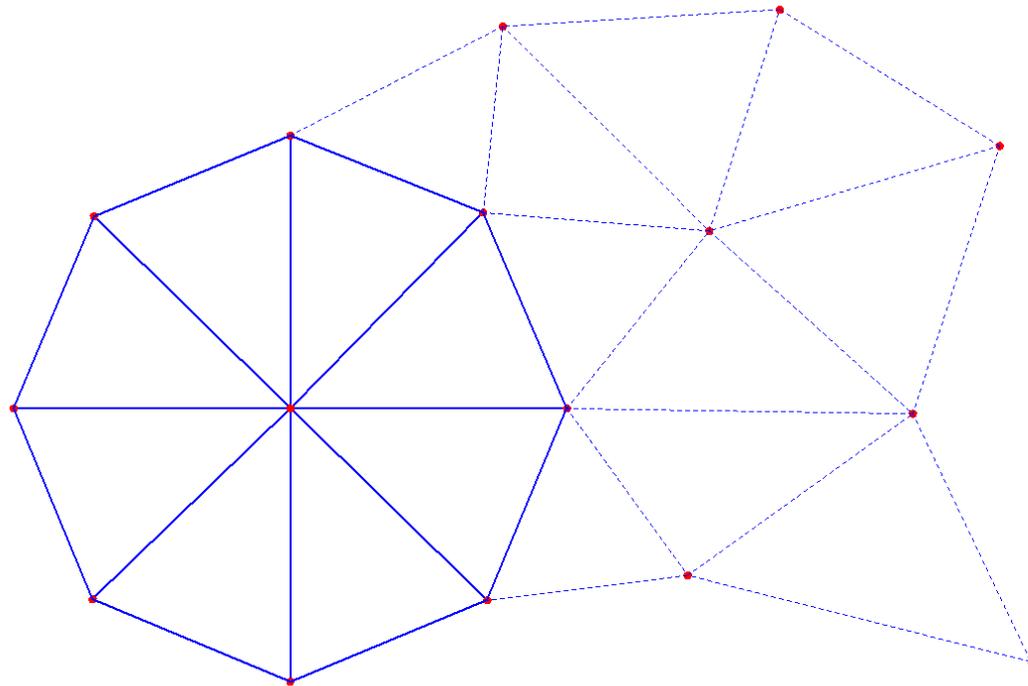
**TRIANGULACIONES DE UN CONJUNTO DE PUNTOS.-**



# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

**TRIANGULACIONES DE UN CONJUNTO DE PUNTOS.-**



## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### DIAGRAMAS DE VORONOI.-

- Las triangulaciones Delaunay presentan ciertas propiedades interesantes entre las que se puede destacar su relación con los denominados diagramas de Voronoi.
- Se conoce como diagrama de Voronoi para un conjunto de puntos  $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ , a la subdivisión del plano en “n” regiones de forma que para cada una de ellas cualquier punto tiene como lugar más cercano del conjunto P al punto  $p_i$ . Es decir, para la región correspondiente al punto  $p_i$  se cumple que para cualquier punto perteneciente a ella:

$$\text{dist}(q, p_i) = \sqrt{(p_{ix} - q_x)^2 + (p_{iy} - q_y)^2} < \underset{j \neq i}{\text{dis}}(q, p_j)$$

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

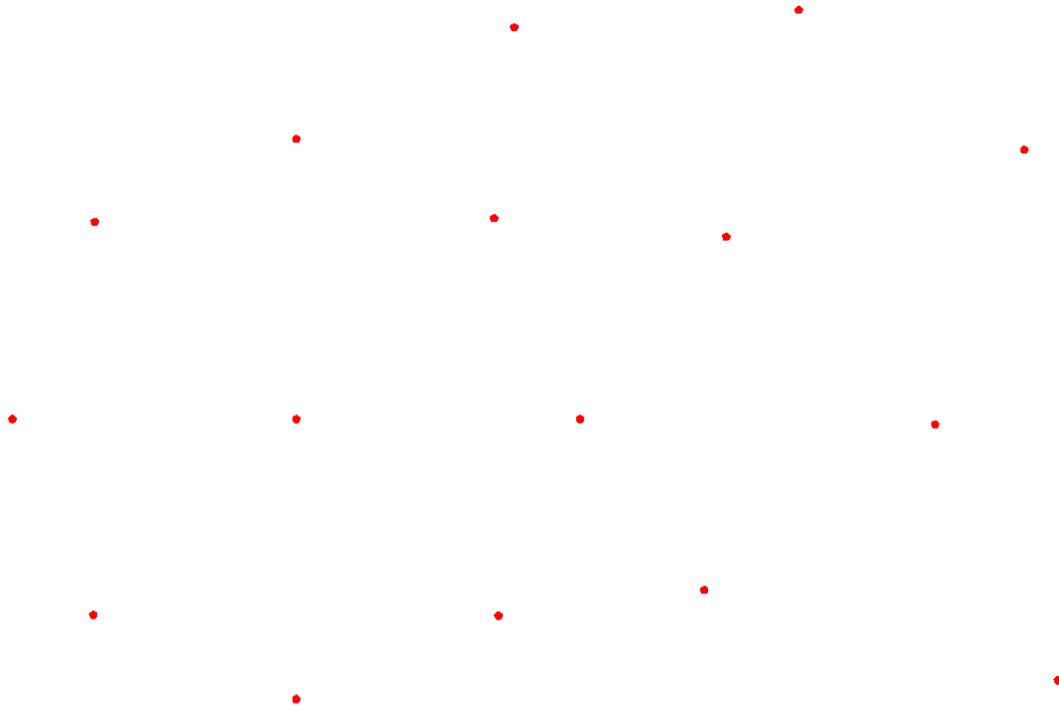
#### DIAGRAMAS DE VORONOI.-

- Dado que los lados son parte de las mediatrices definidas por algunos puntos y no todas las mediatrices dan lugar a vértices, se puede llegar a demostrar que todo punto  $q$  es un vértice si y sólo si la mayor circunferencia vacía de centro  $q$  contiene tres o más puntos del conjunto  $P$ .
- Además, la mediatriz entre los puntos  $P_i$  y  $P_j$  define un lado del diagrama de Voronoi si y sólo si existe algún punto  $q$  perteneciente a ella de modo que definiendo la circunferencia de centro  $q$  y que pasa por  $P_i$  y  $P_j$  no contiene ningún otro punto del conjunto  $P$ .
- La generación del diagrama conlleva las siguientes fases.

# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

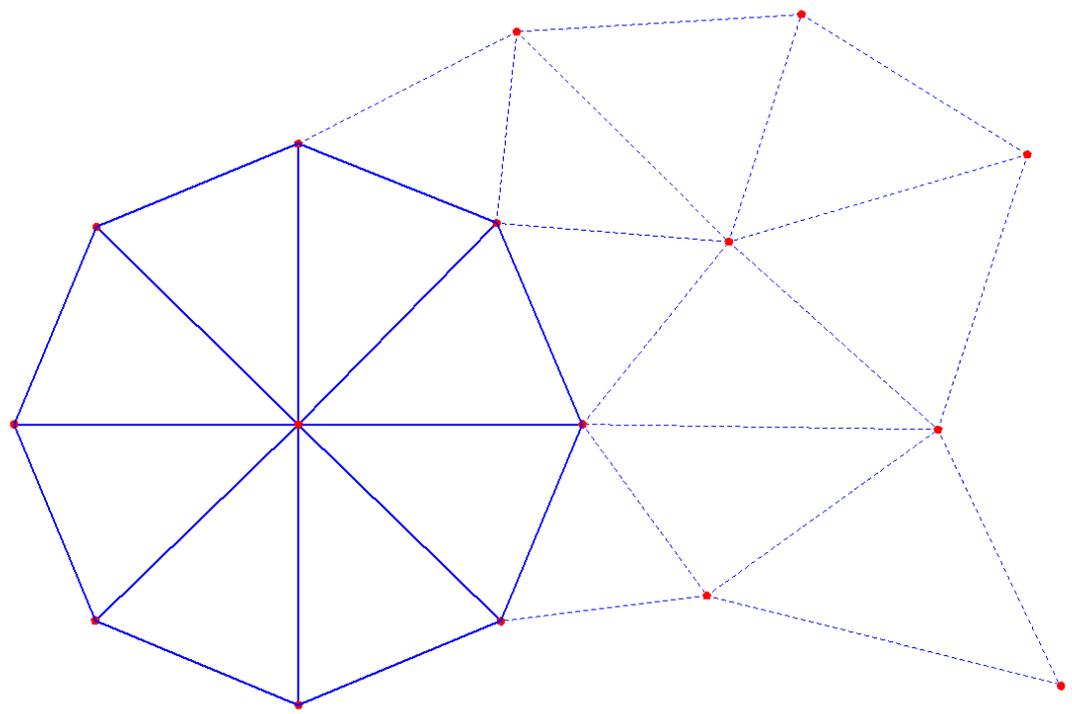
**DIAGRAMAS DE VORONOI.-**



# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

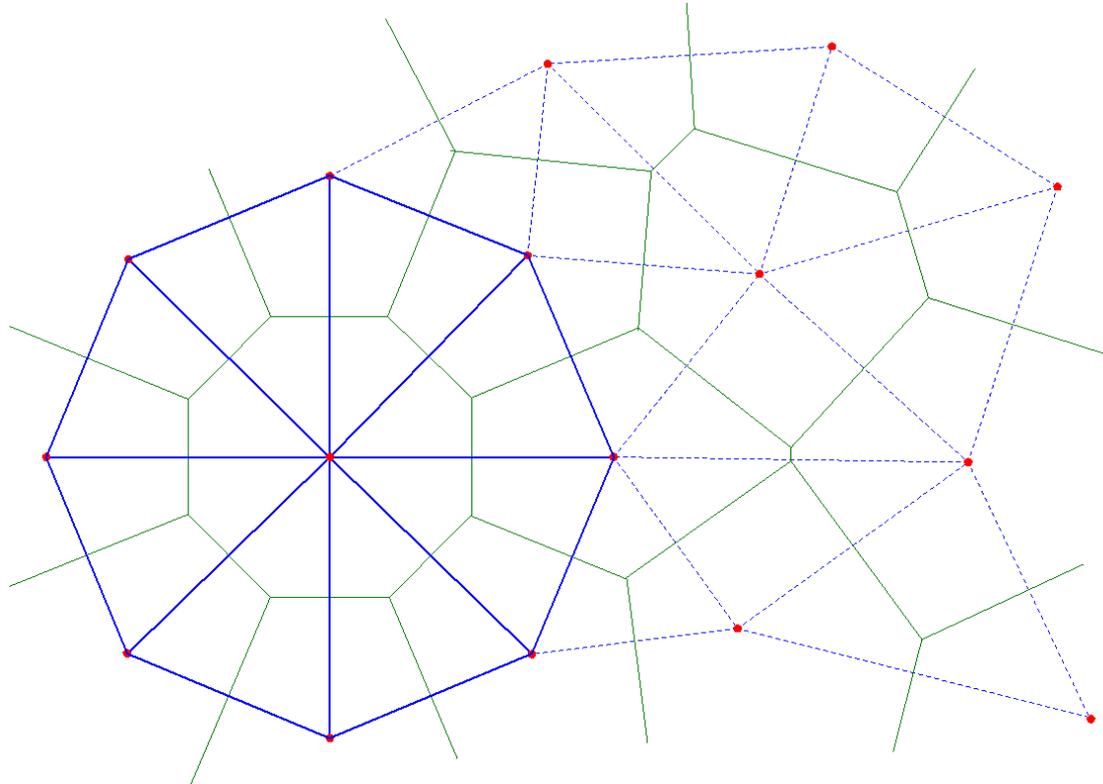
**DIAGRAMAS DE VORONOI.-**



# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

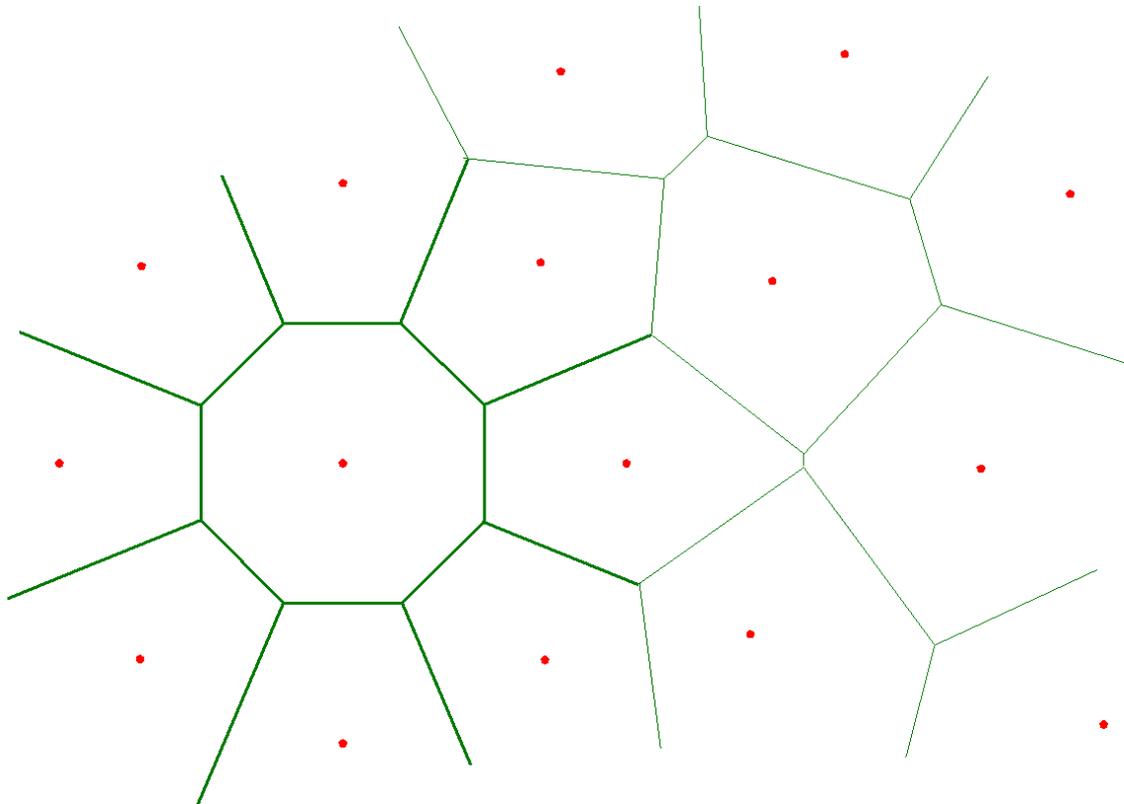
**DIAGRAMAS DE VORONOI.-**



# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

DIAGRAMAS DE VORONOI.-



## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

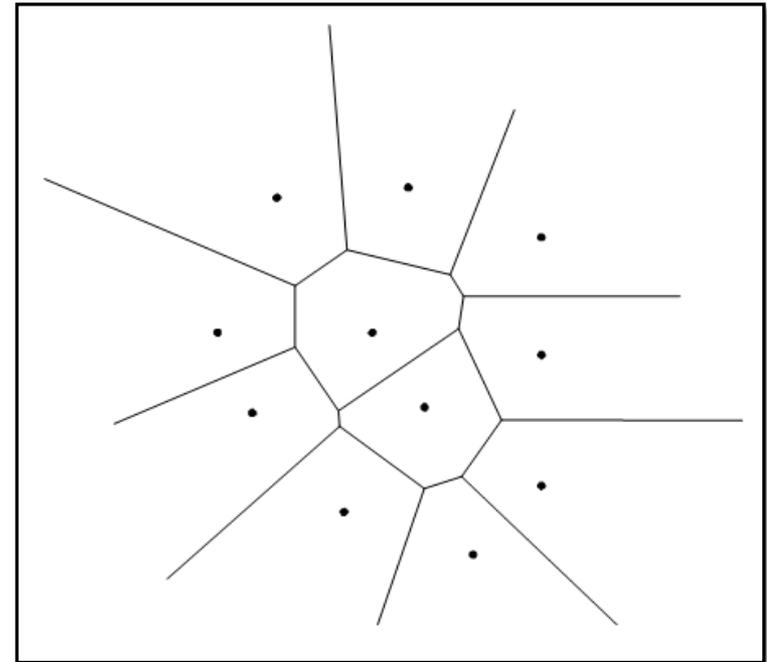
### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### DIAGRAMAS DE VORONOI.-

- El diagrama de Voronoi  $V(P)$  para un conjunto de  $n$  puntos puede definirse como un conjunto de celdas constituidas por  $n-1$  semiplanos y limitada por  $n-1$  vértices y como máximo  $n-1$  lados. Estos lados, siempre y cuando el conjunto de puntos  $P$  no esté alineado, son siempre segmentos o semirrectas.

$$N^{\circ} \text{Vértices}(\text{max}) = 2 \cdot n - 5$$

$$N^{\circ} \text{Lados}(\text{max}) = 3 \cdot n - 6$$



## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### DIAGRAMAS DE VORONOI.-

- El cálculo de los diagramas de Voronoi suele realizarse a partir del llamado algoritmo de Fortune. Éste consiste básicamente en barrer con una línea horizontal el plano, de arriba hacia abajo, cambiando cierta información sólo en los llamados puntos de evento.
- La estrategia consiste, en determinar la intersección de la línea de barrido con el diagrama de Voronoi. Este hecho es difícil de calcular ya que el diagrama depende de la zona barrida tanto como de la zona sin barrer.
- La solución tomada es la de mantener la información del diagrama de Voronoi que depende de los puntos superiores y barridos por la línea antes definida y no por los inferiores, no conocidos.

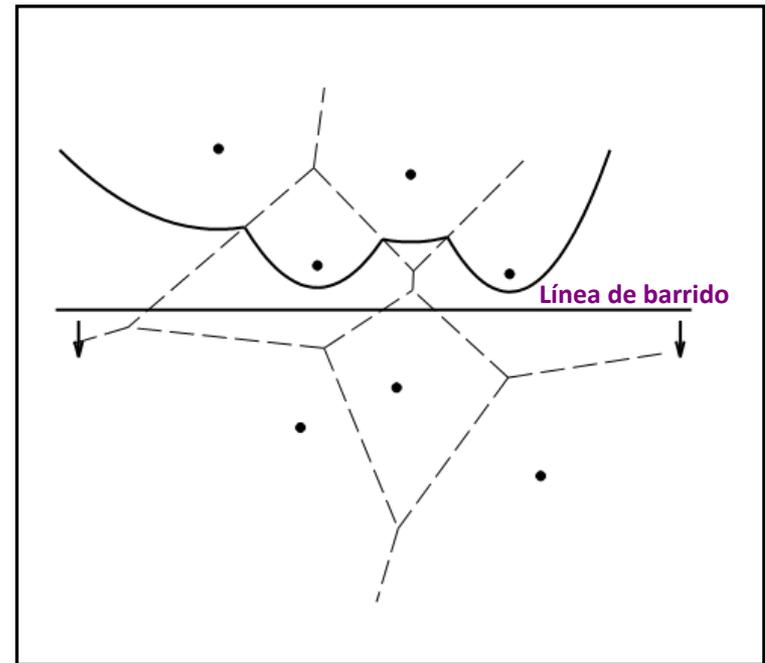
## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### DIAGRAMAS DE VORONOI.-

- Para ello basta con considerar que todo punto de la zona barrida pertenece a la parte del diagrama definida por los puntos ya barridos si la distancia de éste a la recta horizontal es mayor que a uno de los puntos ya barridos. La frontera será una parábola por ser el lugar geométrico de los puntos que equidistan de una recta (la de barrido) y de un punto.

Las intersecciones entre las diferentes parábolas son puntos que pertenecen a los lados del diagrama de Voronoi.

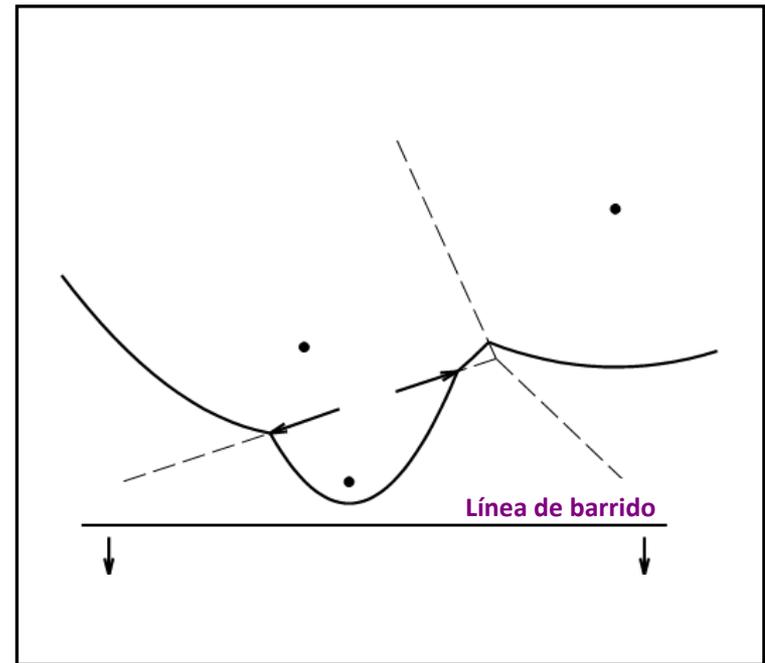


## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### DIAGRAMAS DE VORONOI.-

- Cuando se llega a un punto del conjunto que define el diagrama de Voronoi aparece una nueva parábola, en un principio una línea vertical, que según se avanza en el barrido, va abriéndose definiendo un nuevo lado del diagrama que llegará a conectarse con el resto de lados.

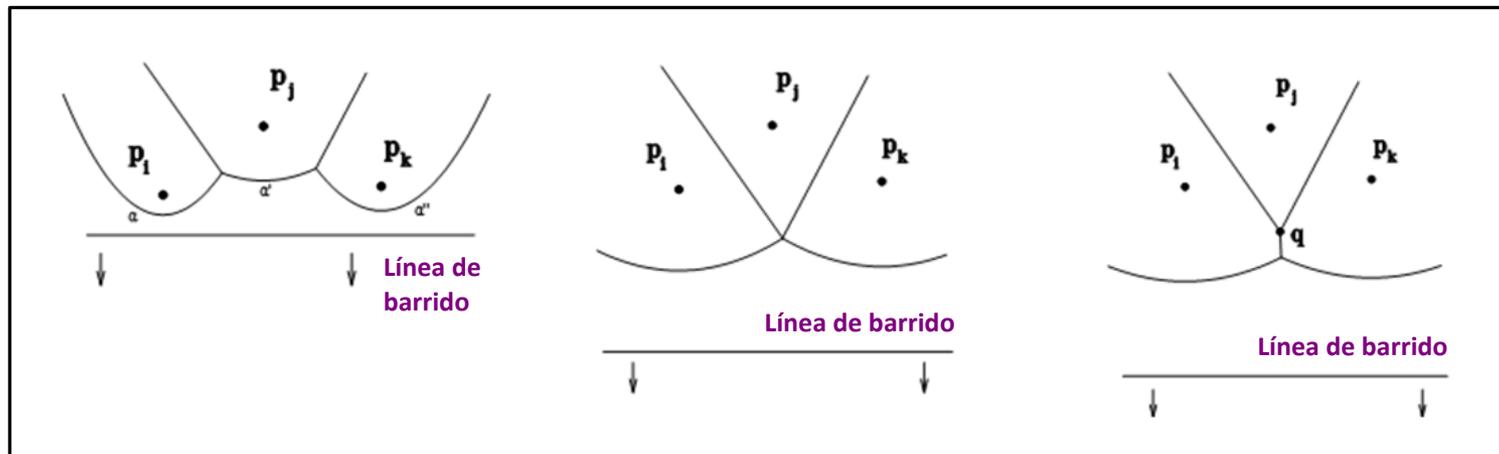


## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### DIAGRAMAS DE VORONOI.-

- El segundo supuesto que se puede plantear es la desaparición de un arco de parábola. En este caso aparece un vértice del diagrama de Voronoi  $q$  caracterizado por definir una circunferencia con centro en él y pasar por, al menos, tres puntos que definen el diagrama sin incluir en ella ningún otro punto.

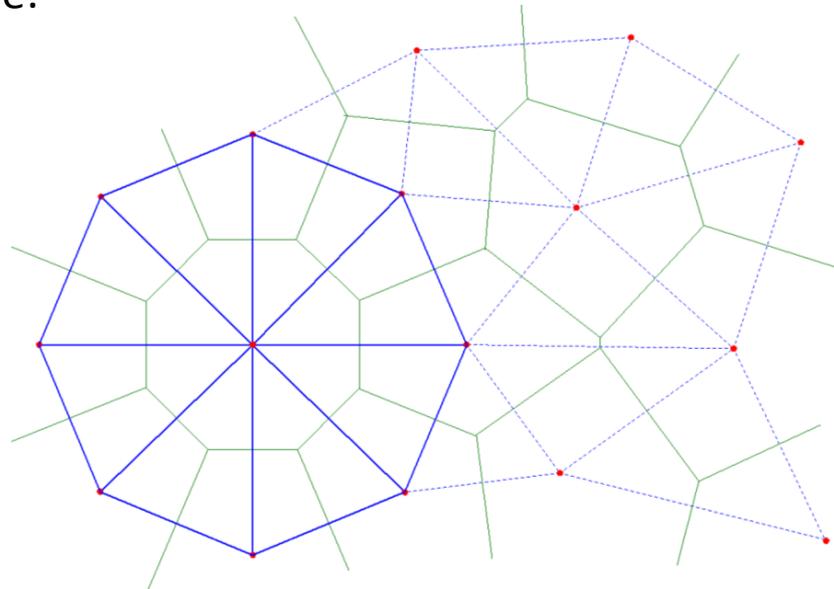


## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

- Para el cálculo de la triangulación de Delaunay hay que destacar que existe una correspondencia directa entre el diagrama de Voronoi y la propia triangulación, ya que cada lado de esta última es perpendicular a un lado del diagrama de Voronoi, tal como muestra la figura que sigue:



## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

- El cálculo de la triangulación hay que advertir que presenta un gran número de propiedades, entre las que cabe destacar las ya reseñadas y que se pueden resumir en:
  - Tres puntos cualesquiera  $P_i$ ,  $P_j$ ,  $P_k$  son vértices del mismo triángulo si y sólo si el círculo que pasa por los tres puntos no contiene ningún otro del conjunto del que se quiere obtener la triangulación.
  - Dos puntos  $P_i$  y  $P_j$  forman el lado de un triángulo de la triangulación si y sólo si existe un círculo que conteniendo ambos puntos en su interior, no es posible encontrar ningún otro punto de la triangulación que esté contenido en él.
- Como consecuencia de todo lo anterior la triangulación de Delaunay se caracteriza por maximizar los ángulos mínimos de sus triángulos.

# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

- Existen diferentes algoritmos que permiten la creación de una triangulación de Delaunay a partir de un conjunto de puntos, en todos ellos se inspecciona si un vértice está dentro de una circunferencia circunscrita o no. Por supuesto es posible programar el circuncentro y la circunferencia circunscrita y después examinar si el vértice está dentro del círculo, pero hay un test más simple y eficiente que usa el denominado “test determinante de una matriz”.
- En dos dimensiones. Si los tres puntos A, B y C forman un triángulo, con los puntos denominados en sentido horario, el punto D está fuera de su circunferencia circunscrita si:

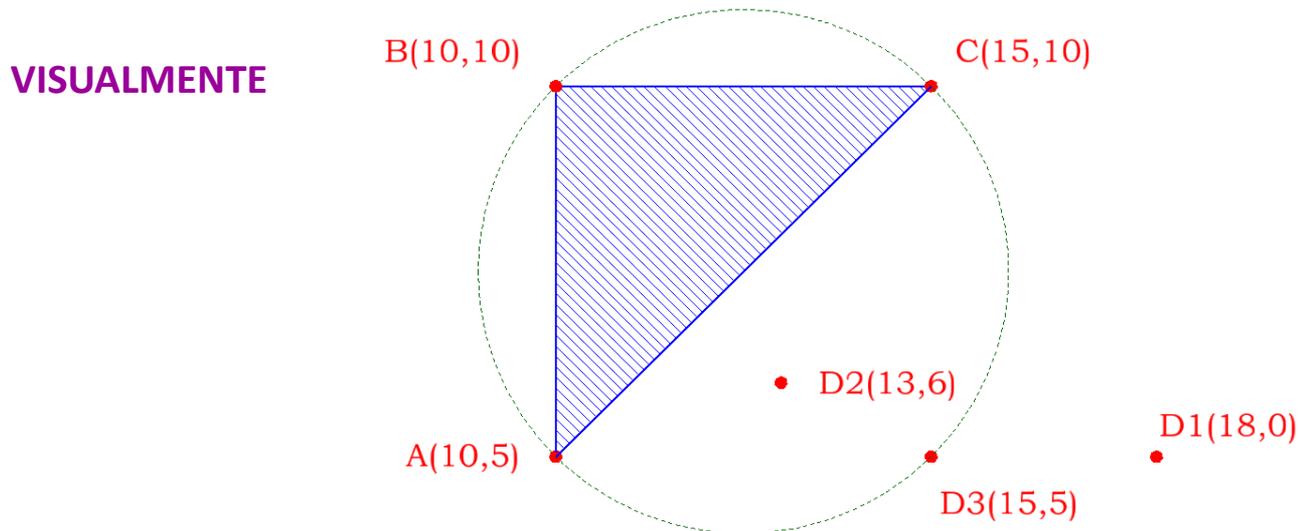
$$\begin{vmatrix} Ax & Ay & Ax^2 + Ay^2 & 1 \\ Bx & By & Bx^2 + By^2 & 1 \\ Cx & Cy & Cx^2 + Cy^2 & 1 \\ Dx & Dy & Dx^2 + Dy^2 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Ax - Dx & Ay - Dy & (Ax - Dx)^2 + (Ay - Dy)^2 \\ Bx - Dx & By - Dy & (Bx - Dx)^2 + (By - Dy)^2 \\ Cx - Dx & Cy - Dy & (Cx - Dx)^2 + (Cy - Dy)^2 \end{vmatrix} > 0$$

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

- Definidos tres puntos por sus coordenadas  $A(10, 5)$ ,  $B(10, 10)$  y  $C(15, 10)$  que forman un triángulo mediante la triangulación de Delaunay, decidir si el triángulo está adecuadamente formado con respecto a un cuarto punto que pueda tener tres posibles posiciones  $D_1(18, 0)$ ,  $D_2(13, 6)$  y  $D_3(15, 5)$ .



# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

$$\begin{matrix} \mathbf{D1} \\ \end{matrix} \begin{vmatrix} Ax - Dx & Ay - Dy & (Ax - Dx)^2 + (Ay - Dy)^2 \\ Bx - Dx & By - Dy & (Bx - Dx)^2 + (By - Dy)^2 \\ Cx - Dx & Cy - Dy & (Cx - Dx)^2 + (Cy - Dy)^2 \end{vmatrix} > 0 \Rightarrow \begin{vmatrix} -8 & 5 & (8)^2 + (5)^2 \\ -8 & 10 & (8)^2 + (10)^2 \\ -3 & 10 & (3)^2 + (10)^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -8 & 5 & 89 \\ -8 & 10 & 164 \\ -3 & 10 & 109 \end{vmatrix} = 1850 > 0$$

$$\begin{matrix} \mathbf{D2} \\ \end{matrix} \begin{vmatrix} Ax - Dx & Ay - Dy & (Ax - Dx)^2 + (Ay - Dy)^2 \\ Bx - Dx & By - Dy & (Bx - Dx)^2 + (By - Dy)^2 \\ Cx - Dx & Cy - Dy & (Cx - Dx)^2 + (Cy - Dy)^2 \end{vmatrix} > 0 \Rightarrow \begin{vmatrix} -3 & -1 & (3)^2 + (1)^2 \\ -3 & 4 & (3)^2 + (4)^2 \\ 2 & 4 & (2)^2 + (4)^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -3 & -1 & 10 \\ -3 & 4 & 25 \\ 2 & 4 & 20 \end{vmatrix} = -370 < 0$$

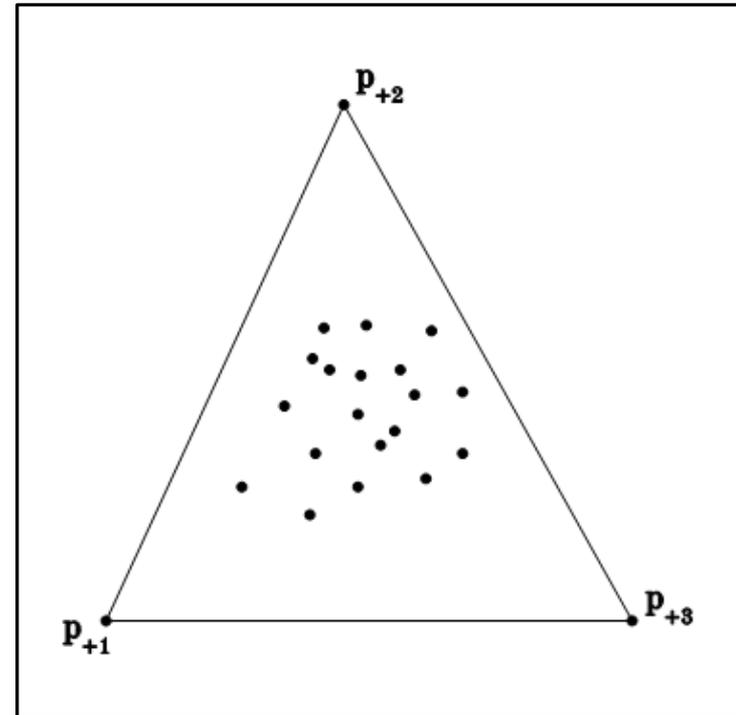
$$\begin{matrix} \mathbf{D3} \\ \end{matrix} \begin{vmatrix} Ax - Dx & Ay - Dy & (Ax - Dx)^2 + (Ay - Dy)^2 \\ Bx - Dx & By - Dy & (Bx - Dx)^2 + (By - Dy)^2 \\ Cx - Dx & Cy - Dy & (Cx - Dx)^2 + (Cy - Dy)^2 \end{vmatrix} > 0 \Rightarrow \begin{vmatrix} -5 & 0 & (5)^2 + (0)^2 \\ -5 & 5 & (5)^2 + (5)^2 \\ 0 & 5 & (0)^2 + (5)^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -5 & 0 & 25 \\ -5 & 5 & 50 \\ 0 & 5 & 25 \end{vmatrix} = 0$$

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

- Normalmente la estrategia seguida para calcular la triangulación de Delaunay de un conjunto de puntos  $P = \{p_1, p_2, p_3 \dots p_n\}$ , consiste en comenzar con un triángulo que contenga dicho conjunto de puntos, calculando la triangulación del conjunto, para luego descartar los tres vértices del triángulo mayor inicial así como todos los triángulos que se apoyen en alguno de ellos a través de sus lados.



# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.2. Triangulación de Delaunay

### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

- Estos puntos iniciales P + 1, P + 2 y P + 3 deben formar un triángulo que contenga todos los puntos del conjunto P y que no interfieran en el algoritmo que da lugar a la triangulación de Delaunay. Las coordenadas propuestas para lograr este objetivo se obtienen a partir de las coordenadas medias, definidas como la media de la menor y la mayor coordenada X e Y respectivamente. Las expresiones resultantes son:

$$\begin{bmatrix} X_{P+1} \\ Y_{P+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{media} - 2 \cdot d_{max} \\ Y_{media} - d_{max} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} X_{P+2} \\ Y_{P+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{media} \\ Y_{media} + 2 \cdot d_{max} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} X_{P+3} \\ Y_{P+3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{media} + 2 \cdot d_{max} \\ Y_{media} - d_{max} \end{bmatrix}$$

- Siendo  $d_{max}$  el rango de mayor variación de la coordenadas X o bien de la coordenada Y.

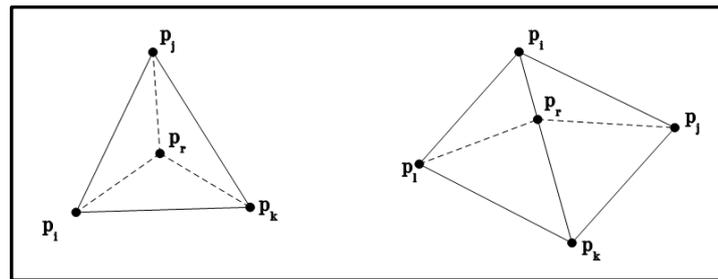
$$d_{max} = MAYOR\{(X_{max} - X_{min}) \text{ ó } (Y_{max} - Y_{min})\}$$

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

- Una vez establecido este primer triángulo, que contiene la nube de puntos, el algoritmo planteará la inclusión aleatoria un punto  $P_r$ , reconstruyendo la triangulación existente de tal modo que se tenga en cuenta el punto recién introducido, dando lugar de este modo a un algoritmo incremental.



- Así, al incluir un punto  $P_r$  se añadirán como lados todos los que conecten dicho punto con los del triángulo en el que está contenido; y si el punto  $P_r$  está contenido en un lado de la triangulación ya existente, se añadirán como lados los que conectan el punto estudiado,  $P_r$ , con los puntos opuestos del triángulo al que pertenece el lado estudiado.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

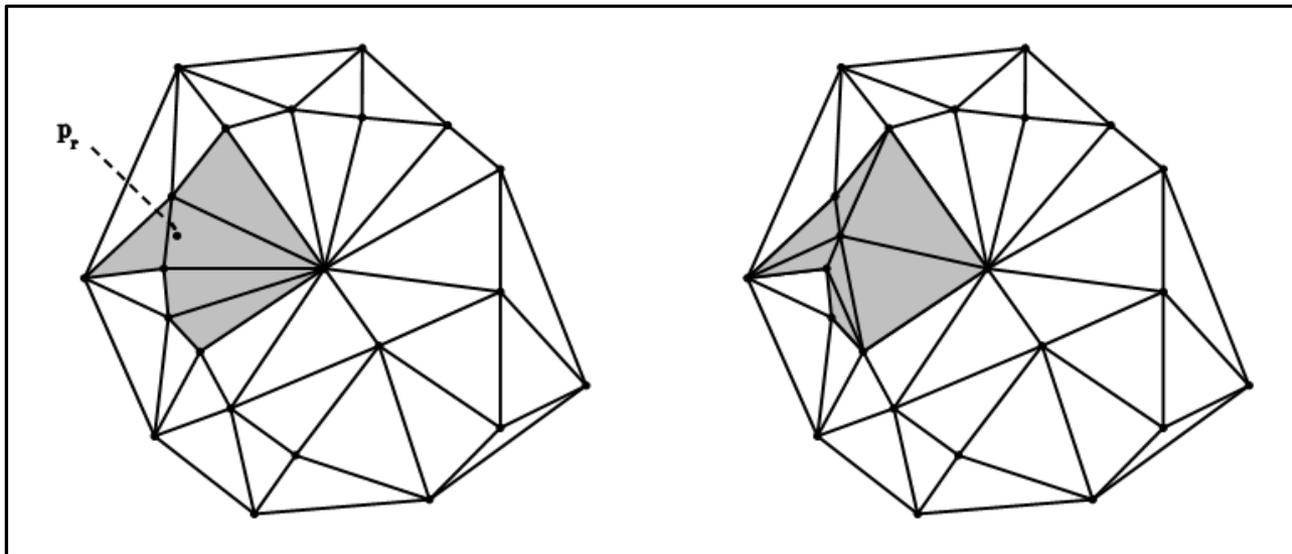
- Esta primera triangulación, obtenida al introducir el punto  $P_r$ , no tiene porqué ser de Delaunay, ya que su inclusión no tiene porqué producir una triangulación en la que los ángulos menores estén maximizados, es decir, en que todos los nuevos lados sean “legales”.
- El siguiente proceso a realizar, por lo tanto, consistirá en “legalizar” los lados de los triángulos que han sido modificados por la inclusión de un determinado punto, es decir, maximizar los ángulos menores y, por lo tanto, modificar la triangulación. Hay que recordar que todo lado es “legal” siempre y cuando la circunferencia que pasa por los tres puntos que define el triángulo del que forma parte el lado estudiado no contiene ningún otro punto, siendo ésta la condición fundamental para llevar a cabo el proceso de legalización propuesto.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

- Para limitar el ámbito de aplicación es fácil establecer que mientras no cambie alguno de los triángulos adyacentes a un lado, éste sigue siendo “legal” al proceder de una triangulación anterior de Delaunay.



## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.2. Triangulación de Delaunay

#### CÁLCULO DE LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.-

- Para encontrar el triángulo al que pertenece un nuevo punto  $P_r$ , se construye una estructura de localización en forma de árbol donde cada nodo se corresponde con un triángulo.
- Su estructura se genera a partir de un nodo inicial que corresponde al triángulo máximo enunciado anteriormente y formado por  $P = \{P_{+1}, P_{+2}, P_{+3}\}$ , y a partir de él se comprueba a cuál de los tres primeros triángulos generados al incorporar el primer punto pertenece el que actualmente se intenta comprobar.
- Se avanza al nivel inferior en el correspondiente triángulo y así sucesivamente hasta llegar al último nivel donde se incorporarán los triángulos generados por el nuevo punto. Es decir, se va avanzando en un diagrama de árbol comprobando y pasando por todos los triángulos que contienen el nuevo punto  $P_r$ .

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

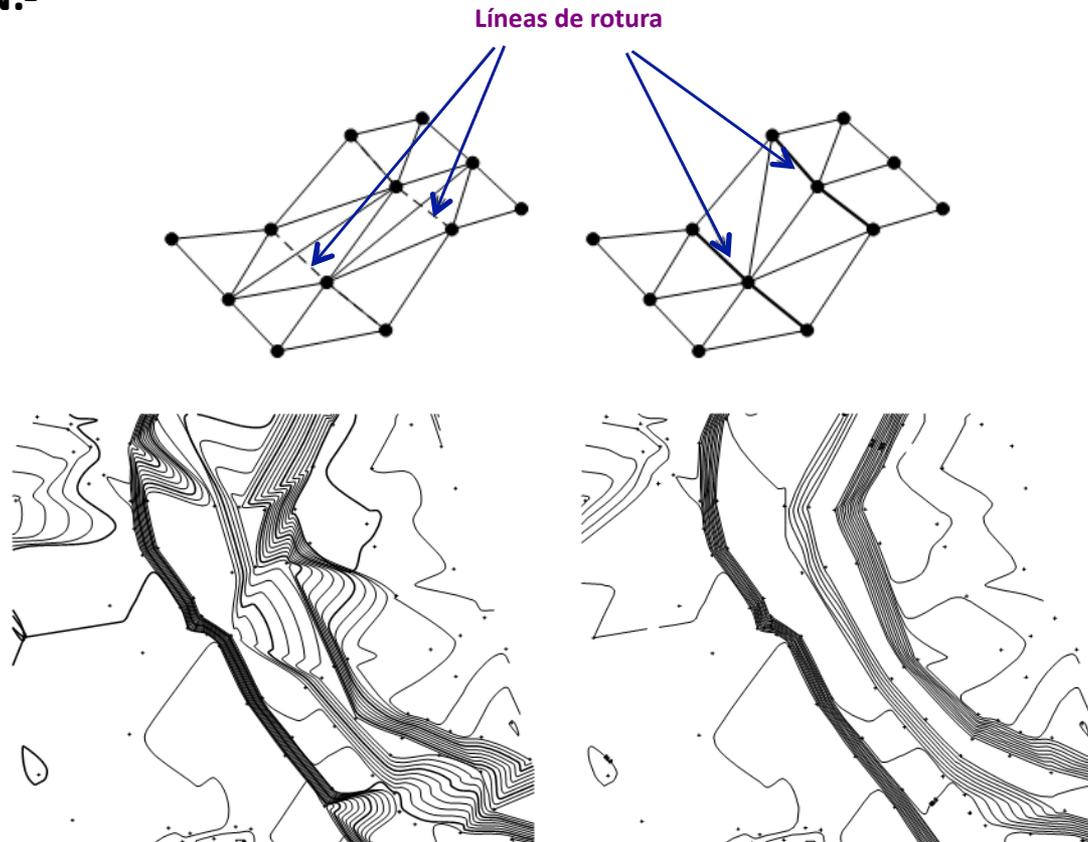
#### INTRODUCCIÓN.-

- En los MDT, se deben incluir condicionantes que establezcan y condicionen la triangulación en el caso de ser un modelo TIN, para lograr la mejor representación del terreno.
- Así puede definirse un MDT constreñido como una triangulación en la que se añaden líneas de rotura para la correcta representación de elementos geográficos como ríos, carreteras, taludes, líneas de costa, muros, etc., y en general todo elemento lineal que sea capaz de definir cambios potenciales de pendiente.
- Las líneas de rotura definen, lados de los triángulos que forman el modelo digital del terreno, no pudiendo existir ningún lado que la corte, constituyendo líneas que definen cambios bruscos de pendiente en el terreno.

# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

### INTRODUCCIÓN.-



## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES DE DELAUNAY COSTREÑIDAS.-

- A partir de un conjunto de puntos se puede obtener un número finito de triangulaciones. Según lo expuesto, la que presenta la máxima equilateralidad es aquella en la que la circunferencia que pasa por los tres vértices de un triángulo no contiene ningún otro. Además, esta triangulación, llamada de Delaunay, es, a priori, la que mejor representa el terreno objeto de modelización. Sin embargo, en ocasiones es necesaria la inclusión de un cierto número de líneas de rotura que serán futuros lados de triángulos para así mejorar la representación del terreno, dando lugar a las llamadas triangulaciones constreñidas de Delaunay.
- Los algoritmos utilizados para el cálculo de este tipo de triangulaciones se dividen en 3 grandes grupos:

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES DE DELAUNAY COSTREÑIDAS.-

1. Se propone la división del conjunto inicial en otros más pequeños, utilizando diferentes criterios, cuando el conjunto es lo suficientemente pequeño la triangulación se convierte en trivial. Evidentemente, es necesaria la reunificación de los diferentes conjuntos, lo que se convierte en uno de los aspectos más complejos de este tipo de algoritmos.
2. Se basa en la definición de una línea de referencia que barre el conjunto. Esta línea imaginaria va recorriendo el conjunto de puntos, realizándose la triangulación según se va recorriendo el plano. Cada nuevo avance de esta línea añade puntos a la triangulación, el algoritmo más popular de este tipo fue propuesto por Fortune y se basa en la construcción de diagramas de Voronoi.
3. El tercer y último grupo son los llamados algoritmos incrementales que son los más utilizados hoy en día y los más simples de plantear. Construyen la triangulación mediante la inserción gradual de nuevos puntos o de nuevos lados.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES DE DELAUNAY COSTREÑIDAS.-

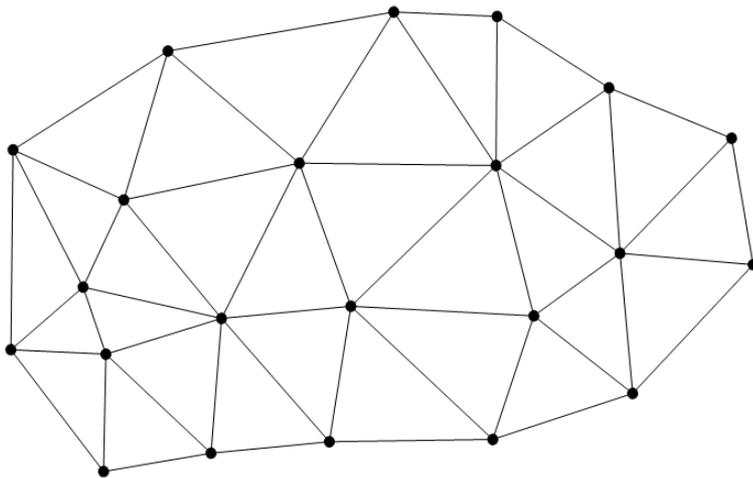
- Los algoritmos actuales y más utilizados, proponen una triangulación de Delaunay en la que posteriormente se añaden las líneas de rotura como lados de triángulos. Así, para una cierta línea de rotura se modificará la triangulación existente siguiendo dos fases principales: eliminación de todos los triángulos cortados por la línea de rotura y posteriormente se re-triangula el área creada denominada pseudopolígono.
- Tal y como se puede apreciar en las siguientes figuras:

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

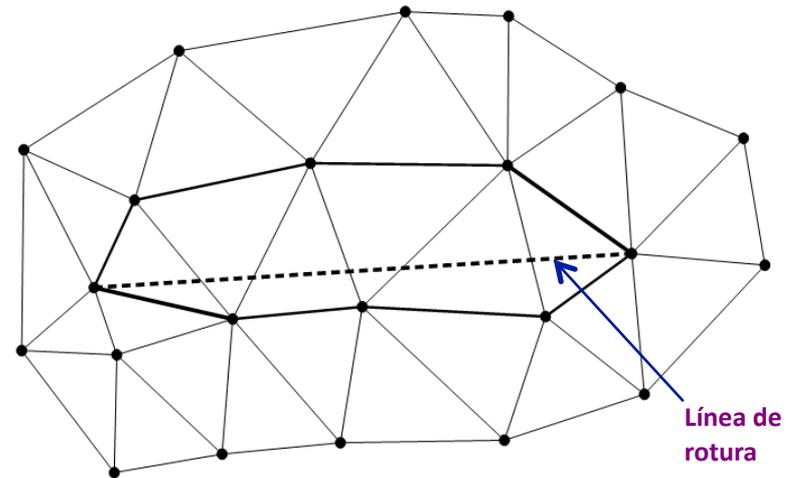
### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES DE DELAUNAY COSTREÑIDAS.-

- La triangulación de estos pseudopóligonos se suele realizar mediante estrategias de divide y conquista.
- Se divide el pseudopolígono según la línea de rotura y se triangulan los dos polígonos resultantes, uniendo, con posterioridad, el resultado obtenido.



A. Triangulación de Delaunay.

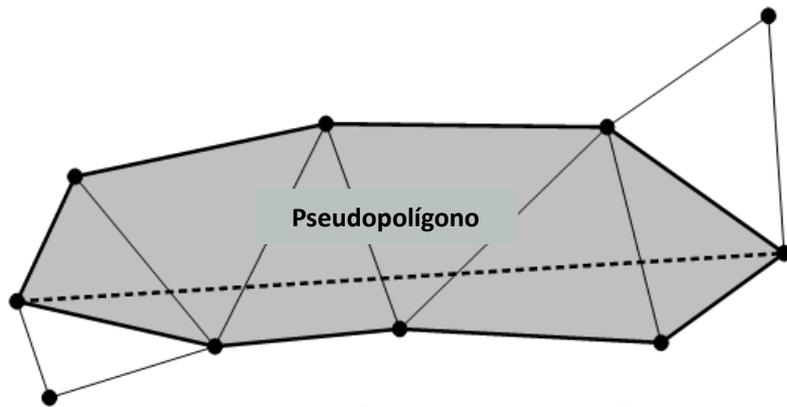


B. Inserción de una línea de rotura.

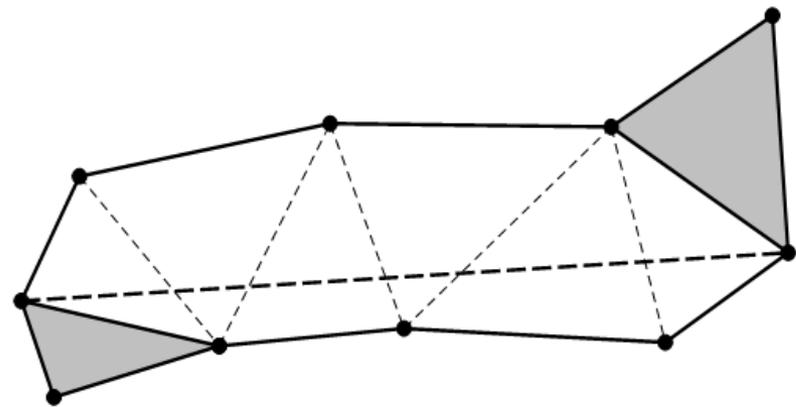
# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

### TRIANGULACIONES DE DELAUNAY COSTREÑIDAS.-



C. Definición del pseudopólígono.

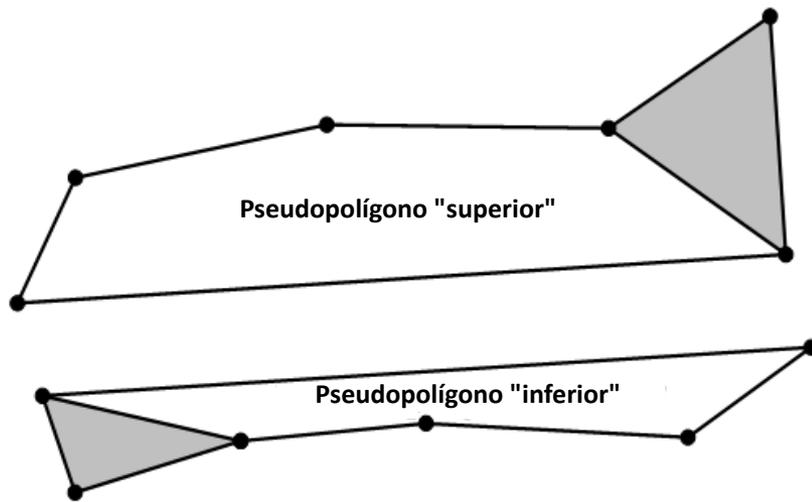


D. Vaciado del pseudopólígono.

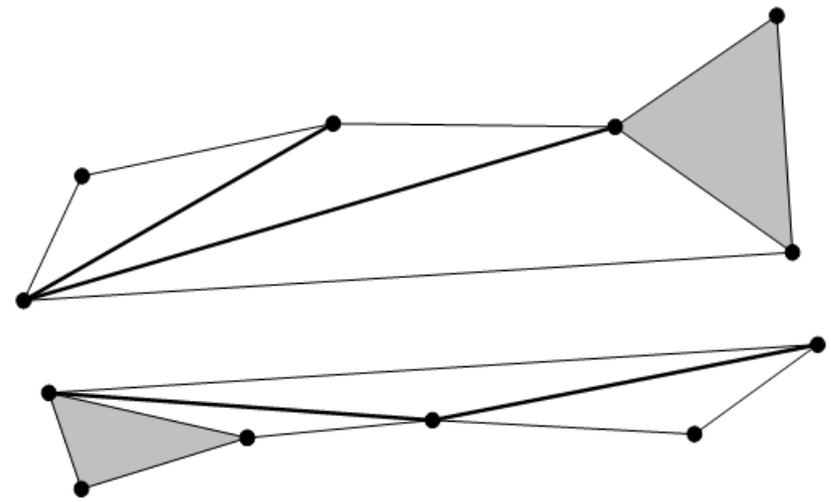
# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

**TRIANGULACIONES DE DELAUNAY COSTREÑIDAS.-**



**E. División del pseudopolígono.**



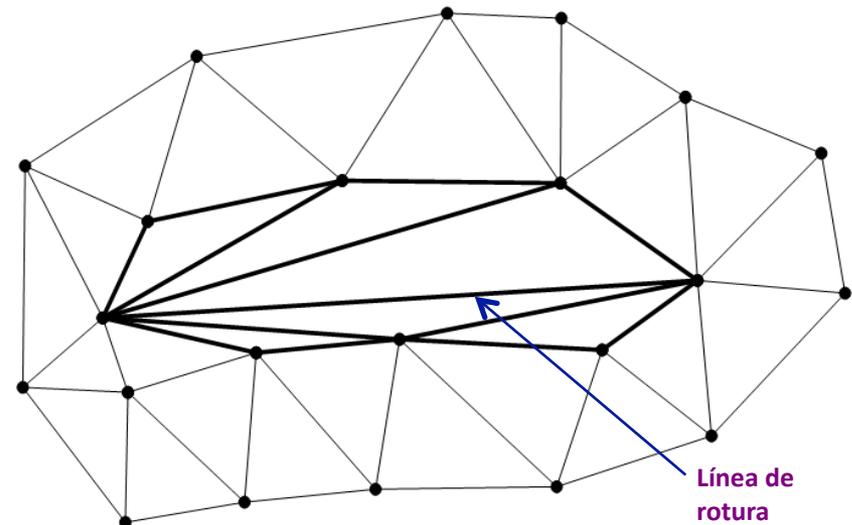
**F. Retriangulación de los semi-pseudopolígonos.**

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES DE DELAUNAY COSTREÑIDAS.-

- La triangulación resultante no tiene por qué ser una triangulación de Delaunay, aunque deriva de ella, ya que las líneas de rotura, al forzar los lados de un cierto número de triángulos, dan lugar a lados “ilegales”. Aún así se suelen denominar triangulaciones de Delaunay constreñidas (CDT).
- Este tipo de triangulaciones son las más extendidas en usos topográficos al ser las que mejor representan la realidad del terreno objeto de modelización.



G. Reunificación del conjunto.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

##### INTRODUCCIÓN.-

- En el caso de los levantamientos subacuáticos y en general, en los MDT en que los puntos a partir de los que se generan éstos han sido obtenidos de manera “aleatoria” o “modelos ciegos”, se produce una contradicción: la mejor representación del terreno será mediante una triangulación constreñida pero, sin embargo, las líneas de rotura son “a priori” desconocidas.
- No obstante, se admite que éstas aparecen de forma implícita en la nube de puntos. Es decir, el conjunto de datos a partir del que se forma el modelo digital del terreno permite establecer las líneas de rotura apropiadas para definir la aproximación al terreno con la máxima fidelidad posible partiendo de los puntos originales.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

##### INTRODUCCIÓN.-

- Para que la afirmación anterior sea cierta se debe asumir que el conjunto de puntos de coordenadas conocidas a partir del que se va a formar el MDT es lo suficientemente representativo de éste, es decir, formará una red cuya densidad será la apropiada para representar la topografía del terreno al que hace referencia al nivel de detalle exigido.
- Las líneas de rotura presentan como característica fundamental que definen potenciales cambios bruscos de la pendiente del terreno. La cuantificación de “brusco” dependerá, en principio, del tipo de terreno, y, en cualquier caso, en los MDT es fácil calcular la pendiente como el ángulo entre los diferentes triángulos que forman el modelo y el plano horizontal.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

##### INTRODUCCIÓN.-

- La primera solución que se puede plantear es la de medir y tomar una nube de puntos sobredimensionada de forma que el número de puntos sea lo suficientemente grande como para que las zonas interpoladas sean del menor tamaño posible, la mejora de la modelización conlleva definir una triangulación de Delaunay y mediante una visualización, por ejemplo a partir de isolíneas o curvas de nivel, establecer manualmente las roturas mediante prueba error. Este proceso es extraordinariamente laborioso y, por lo tanto, muy costoso para modelizaciones del terreno de cierta entidad superficial.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

##### INTRODUCCIÓN.-

- Una segunda solución parte de intentar dar respuesta a la pregunta: *¿qué le falta a la triangulación de Delaunay, partiendo de un conjunto de puntos aleatorio?*
- La respuesta se puede concretar en que para efectuar dicha triangulación no se utilizan todos los datos disponibles. Es decir, la triangulación de Delaunay, tal como se ha desarrollado, atiende exclusivamente a las posiciones planimétricas de los puntos y no a su cota. Entonces, partiendo de un modelo de Delaunay como primera aproximación, puede incluirse la coordenada Z para mejorarlo, con lo cual se pasa a utilizar toda la información disponible.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

##### INTRODUCCIÓN.-

- Se hace necesario, por tanto, un nuevo algoritmo del que sólo se puede esperar una triangulación mejorada a partir de los puntos que la definen, en el que se tomen como datos las tres componentes de sus coordenadas. Este hecho trae como consecuencia que el conjunto de puntos debe ser tal que permita una representación fidedigna del terreno mediante un modelo digital del terreno, o lo que es lo mismo: no quedará reflejada ninguna línea de rotura o elemento del terreno que no sean susceptibles de ser generados a partir de los puntos disponibles para formar el modelo.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

##### ALGORITMO DE MÁXIMA PENDIENTE.-

- Partiendo de la triangulación de Delaunay, y asumiendo que refleja la forma del terreno de manera bastante aproximada, se propone una corrección de ésta. Para ello el elemento fundamental de estudio es el triángulo, el cual, a su vez, define tres triángulos vecinos como aquéllos que presentan un lado común con el primero.
- Así, si se elige para un determinado triángulo uno de sus vecinos y se estudia el ángulo que forman ambos a partir de sus vectores normales, se puede esperar que la situación ideal es aquélla en que este ángulo fuera máximo. Esta afirmación, como primera aproximación, puede tomarse como correcta, de forma que se puede buscar la situación expuesta según el desarrollo siguiente.

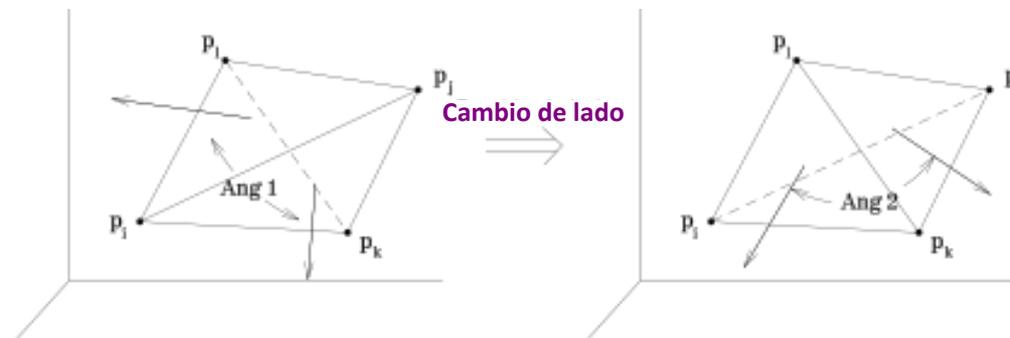
## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

#### ALGORITMO DE MÁXIMA PENDIENTE.-

- El proceso consiste en establecer para un par de triángulos la situación de máximo ángulo intercambiando el lado común, es decir, se busca de las dos situaciones posibles cuál de las diagonales define el mayor ángulo entre triángulos, con independencia de que sea un lado “legal”.



- El problema del cálculo del sentido de los vectores normales se puede solventar fácilmente estableciendo un sentido único en la definición de los vértices de los triángulos.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

#### ALGORITMO DE MÁXIMA PENDIENTE.-

- Debido al carácter finito de las posibles triangulaciones de una nube de puntos este proceso se puede resolver de forma iterativa hasta que el número de cambios generados a partir de la triangulación anterior sea nulo, con lo cual se obtiene una triangulación en la que todos sus triángulos maximizan el ángulo con sus vecinos.
- Los resultados así obtenidos NO son satisfactorios debido a que la propagación de las iteraciones distorsionan el resultado de forma general. Dada la problemática se planteó cambiar de estrategia, atendiendo a la pendiente del lado común, de forma que una variación sustancial de la misma entre la triangulación inicial y la triangulación alternativa indique un cambio de pendiente en el MDT.

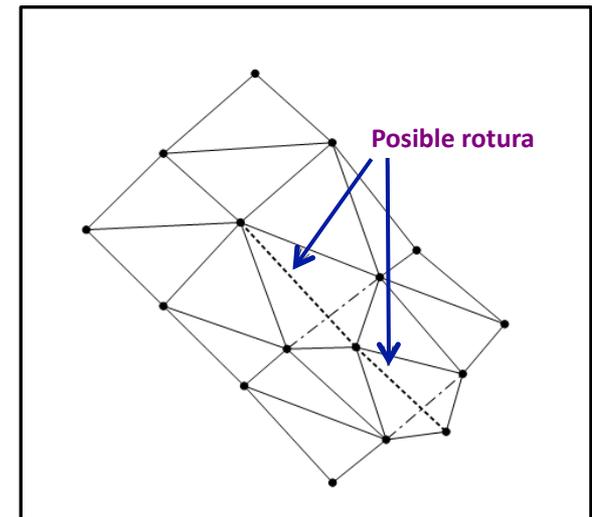
## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

#### ALGORITMO DE MÁXIMA PENDIENTE.-

- Este procedimiento es muy acertado para modelos con mucha densidad de puntos en determinadas direcciones o trayectorias y no lo es tanto en otro tipo de modelos en que la disposición de los puntos que lo definen es sensiblemente homogénea.
- Para determinar la situación buscada se puede realizar una primera aproximación según la cual una rotura, en los casos más comunes, presenta menos pendiente que la diagonal alternativa. Sin embargo, esto supone sacrificar aquellas roturas que, caso de las vías de agua en pendientes fuertes, presentan gran inclinación.



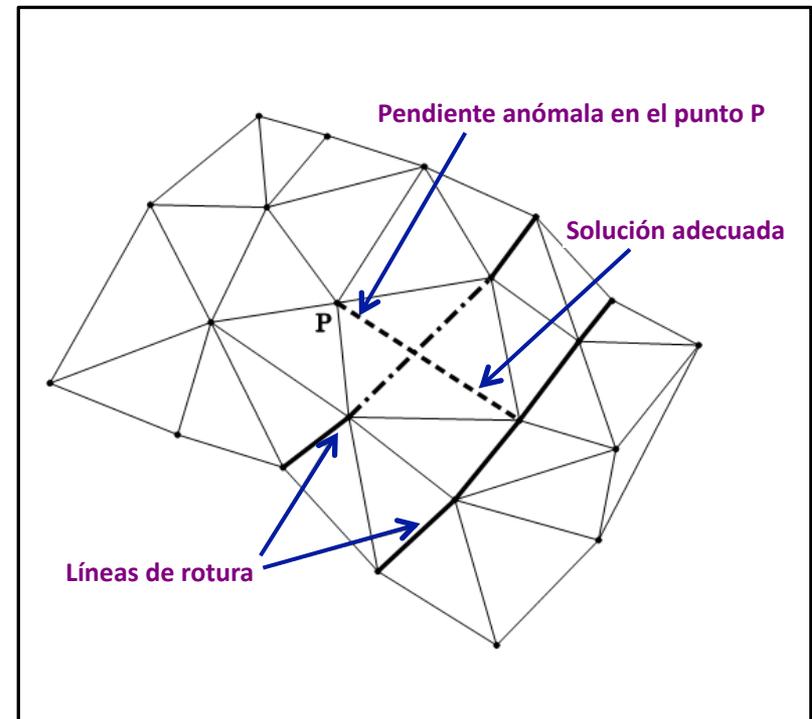
## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

#### ALGORITMO DE MÁXIMA PENDIENTE.-

- El estudio de la existencia de una línea de rotura no se puede inscribir a un cuadrilátero en concreto, siendo la forma del modelo localmente la que defina o valide la posible existencia de ella y, por lo tanto, discrimine entre las dos diagonales posibles en ese cuadrilátero.



## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

#### ALGORITMO DE MÁXIMA PENDIENTE.-

- Una vez detectada la posible existencia de una rotura, se calcula la pendiente media del modelo en cada uno de los cuatro vértices del cuadrilátero estudiado. Para ello se buscan los vértices vecinos a uno dado y que estén conectados mediante un lado de un triángulo. Una vez completado el proceso, se calcula para todos los lados convergentes en un vértice las pendientes y se manipula la muestra de modo que sin perder tamaño permita obtener un valor de comparación adecuado. Basta con obtener una muestra winsorizada  $\alpha = 0.2$ , a partir de la que se determina su media.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

#### ALGORITMO DE MÁXIMA PENDIENTE.-

- Dado que una rotura define un cambio brusco de pendiente, su definición errónea supone que el lado común así establecido presenta una discontinuidad en la superficie generada y, por lo tanto en, al menos, uno de sus vértices, supone una pendiente discrepante con las calculadas previamente.
- Para establecer esta condición numéricamente a partir de la muestra winsorizada se calcula, también, el error medio cuadrático ( $e_c$ ).

$$e_c = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

#### ALGORITMO DE MÁXIMA PENDIENTE.-

- Suponiendo que la muestra sigue una distribución normal se puede tipificar el valor de la pendiente para la diagonal que llega a un vértice según la expresión:

$$z = \frac{p_i - \bar{x}}{e_c}$$

- Repitiendo este proceso con los cuatro vértices del cuadrilátero estudiado, es de esperar que la pendiente del lado común que llega a uno de ellos defina un valor tipificado sensiblemente alejado de la media, en este caso el valor nulo. Es precisamente esta diagonal, por lo tanto, la que se establece como no adecuada.

## 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 5.3. Modelos digitales del terreno costreñidos

#### TRIANGULACIONES CON CONSTRICCIONES DESCONOCIDAS A PRIORI.-

#### ALGORITMO DE MÁXIMA PENDIENTE.-

- Con este modo de proceder se establece un criterio por el que es posible discriminar posibles roturas “falsas” en función de las pendientes del modelo localmente, con lo cual se impone la condición de máxima continuidad de pendientes, es decir, en ningún caso se admiten pendientes que puedan alterar por sí solas la continuidad altimétrica del modelo.
- La posible existencia de roturas queda claramente limitada por la representatividad de la nube de puntos, es decir, no se podrá definir ninguna línea de rotura de forma automática si la nube de puntos no tiene la suficiente densidad como para definirla como tal.

# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.4. El proceso de interpolación

### OBTENCIÓN DE COTAS EN CUALQUIER PUNTO DEL MODELO.-

- Existen diferentes aplicaciones informáticas con procedimientos diferentes, tal y como es ha visto en el epígrafe anterior, aunque el procedimiento más extendido empieza a ser:
  - Obtención la ecuación matemática del plano definido por cada triángulo definido en la Triangulación de Delaunay.

$$\begin{bmatrix} X - X_1 & Y - Y_1 & Z - Z_1 \\ X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & Z_2 - Z_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y & Z_3 - Z_1 \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0$$

- Dada la posición planimétrica del punto, tan sólo hay que introducirla en la ecuación del plano y deducir la Z.

# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.4. El proceso de interpolación

**OBTENCIÓN DE COTAS EN CUALQUIER PUNTO DEL MODELO.-**

**EJEMPLO.-**

- Determinar la ecuación de un plano que contiene a los puntos:

$$A [3, 2, 1] ; B [-4, -1, 1] ; C [-5, -3, -1]$$

- Determinar la cota de un punto de coordenadas:

$$D [10, -5]$$

- Comprobar que la cota resultante esta contenida en el plano:

$$P[X_o, Y_o, Z_o] \Leftrightarrow \pi \equiv [A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0]$$

$$dist_{\pi}^P = \frac{|A \cdot X_o + B \cdot Y_o + C \cdot Z_o + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$

# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.4. El proceso de interpolación

OBTENCIÓN DE COTAS EN CUALQUIER PUNTO DEL MODELO.-

**EJEMPLO.-**

**COTA DEL PUNTO.-**

$$A [3, 2, 1] ; B [-4, -1, 1] ; C [-5, -3, -1]$$

$$\begin{bmatrix} X - X_1 & Y - Y_1 & Z - Z_1 \\ X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & Z_2 - Z_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & Z_3 - Z_1 \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0$$

$$\begin{bmatrix} X - 3 & Y - 2 & Z - 1 \\ -4 - 3 & -1 - 2 & 1 - 1 \\ -5 - 3 & -3 - 2 & -1 - 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - 3 & Y - 2 & Z - 1 \\ -7 & -3 & 0 \\ -8 & -5 & -2 \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow$$

$$6 \cdot x - 14 \cdot y + 11 \cdot z - 1 = 0$$

# 5. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 5.4. El proceso de interpolación

OBTENCIÓN DE COTAS EN CUALQUIER PUNTO DEL MODELO.-

**EJEMPLO.-**

**ECUACIÓN DEL PLANO.-**

**D [10, -5]**

$$6 \cdot x - 14 \cdot y + 11 \cdot z - 1 = 0$$

$$6 \cdot 10 - 14 \cdot (-5) + 11 \cdot z - 1 = 0$$

$$Z = -11,727$$

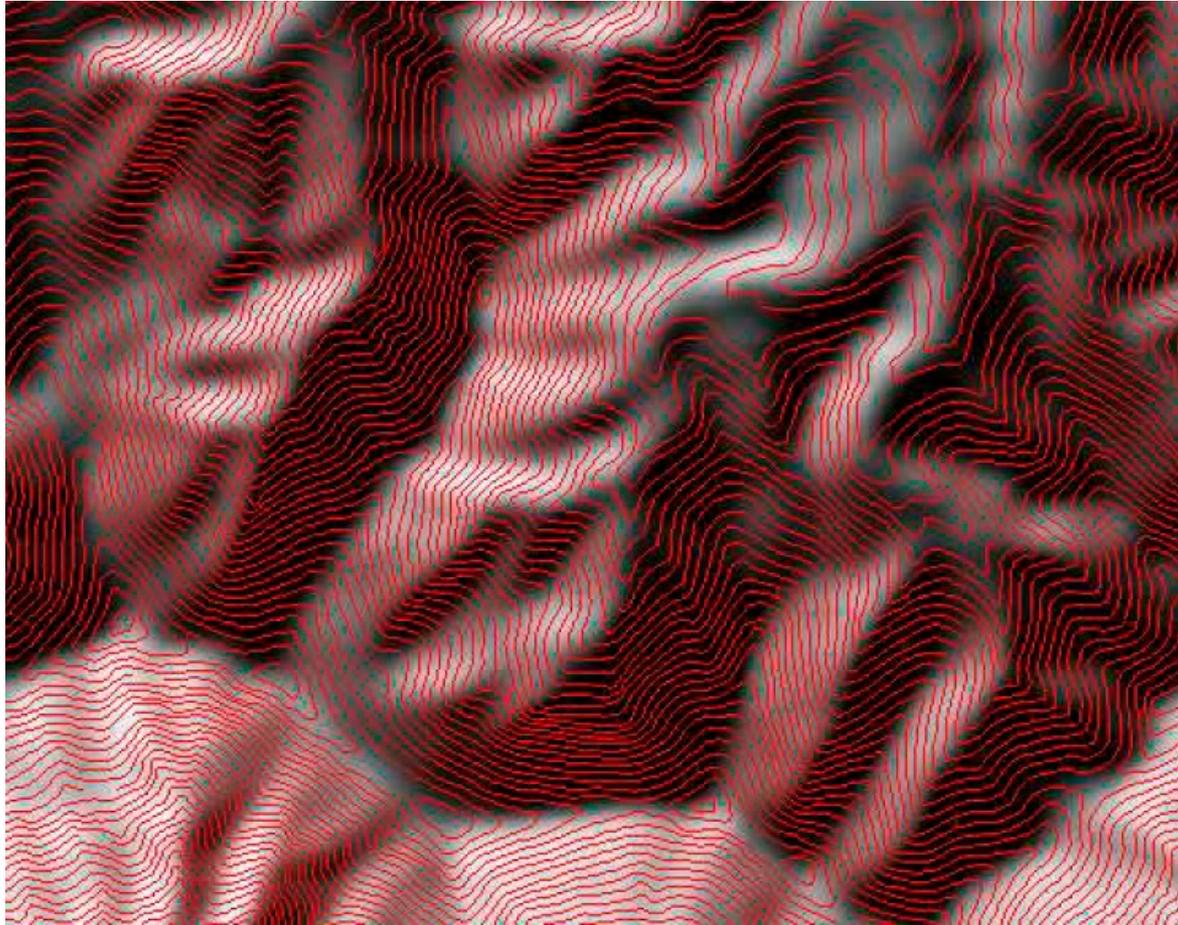
**COMPROBACIÓN.-**

$$P[X_o, Y_o, Z_o] = [10, -5, -11.727] \Leftrightarrow \pi \equiv [A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 6 \cdot x - 14 \cdot y + 11 \cdot z - 1 = 0]$$

$$dist_{\pi}^P = \frac{|A \cdot X_o + B \cdot Y_o + C \cdot Z_o + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = \frac{|6 \cdot 10 + (-14) \cdot (-5) + 11 \cdot (-11.727) + (-1)|}{\sqrt{6^2 + 14^2 + 11^2}} = 0$$

## 6. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

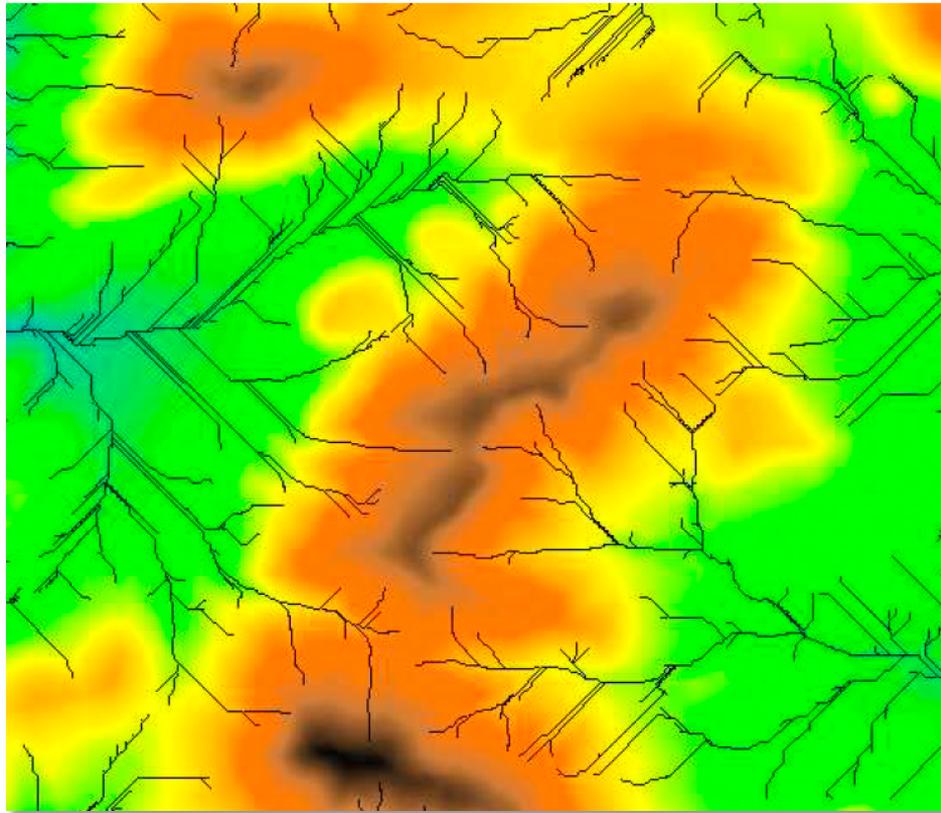
### 6.1. Generación de curvas de nivel



## 6. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 6.2. Explotación de las curvas de nivel

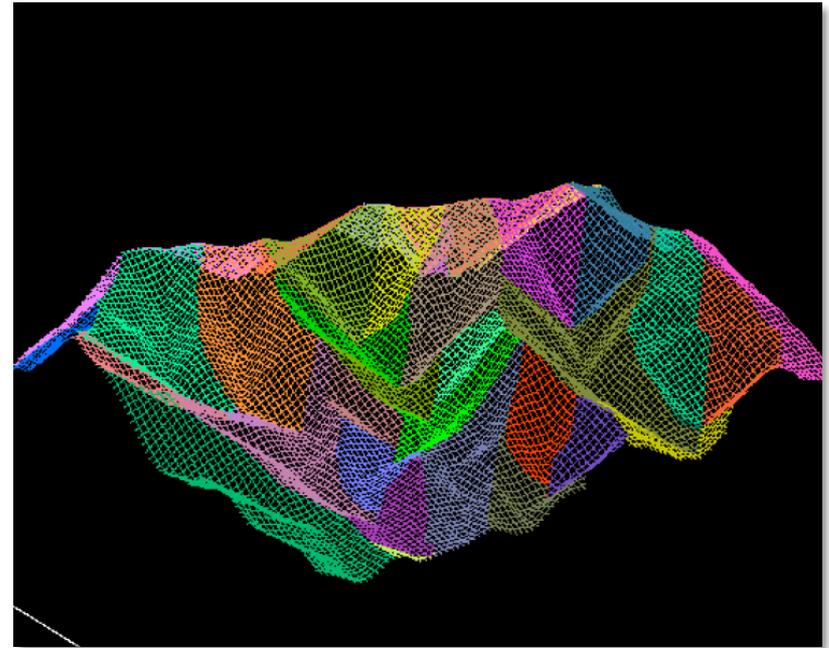
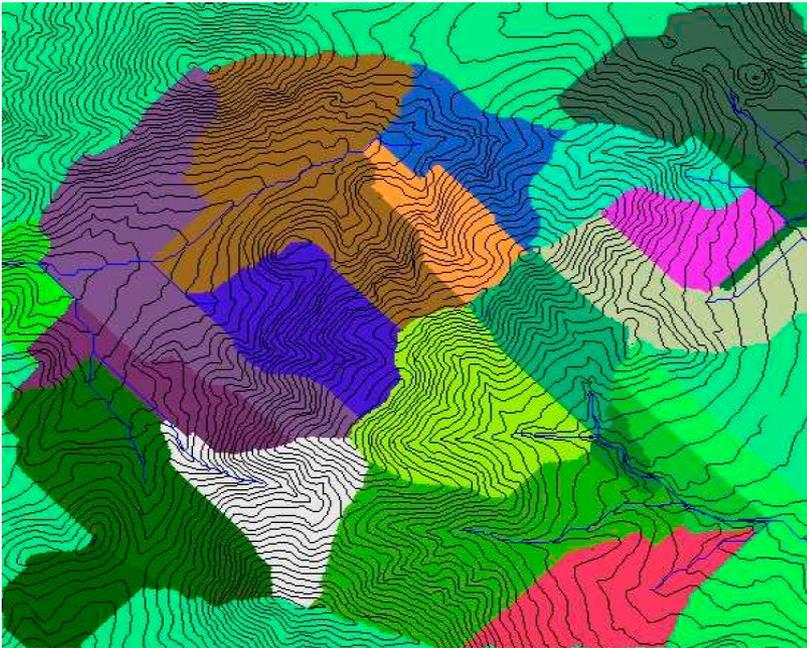
**REDES DE DRENAJE.-**



## 6. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 6.2. Explotación de las curvas de nivel

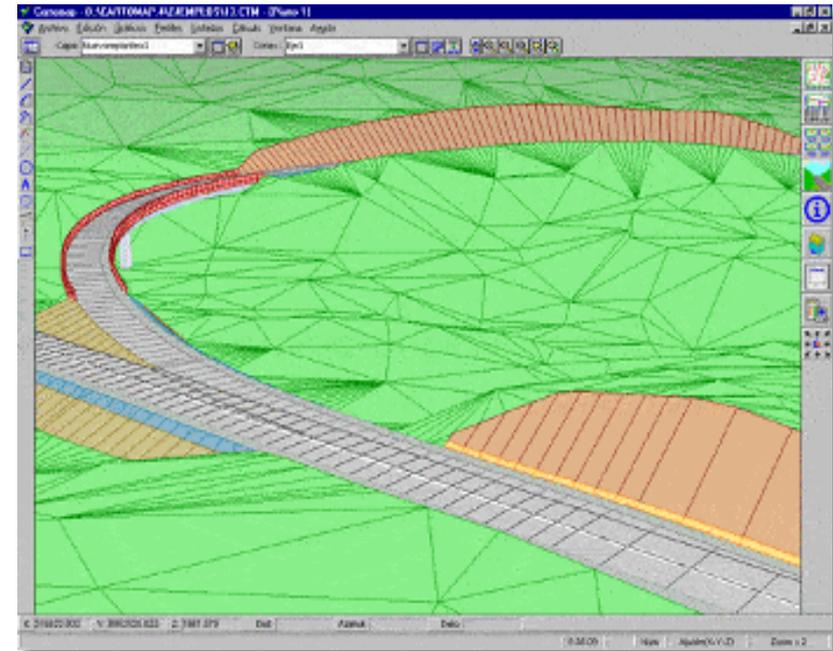
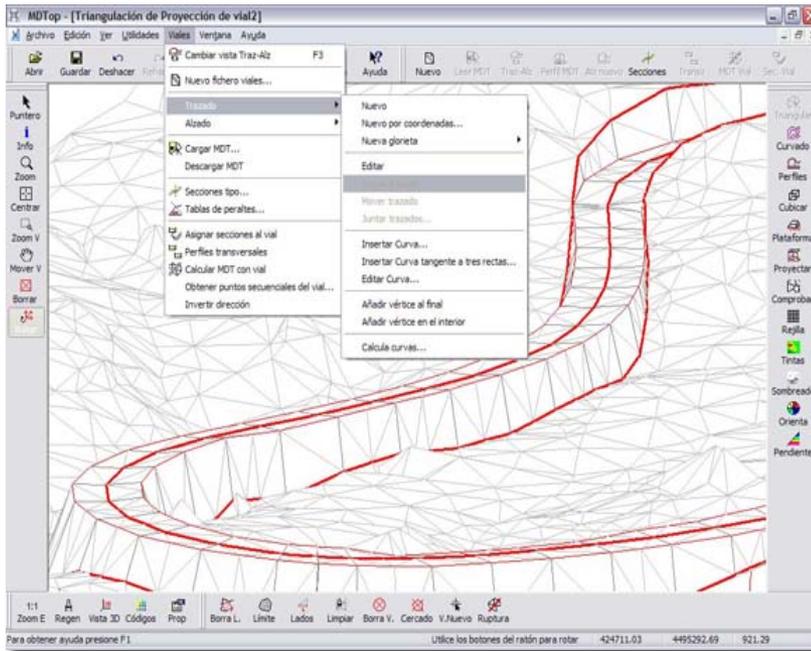
**CUENCAS DE APORTACIÓN.-**



# 6. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 6.2. Explotación de las curvas de nivel

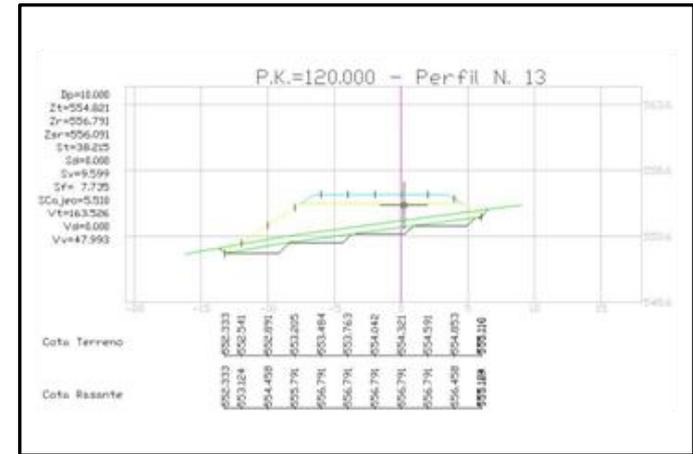
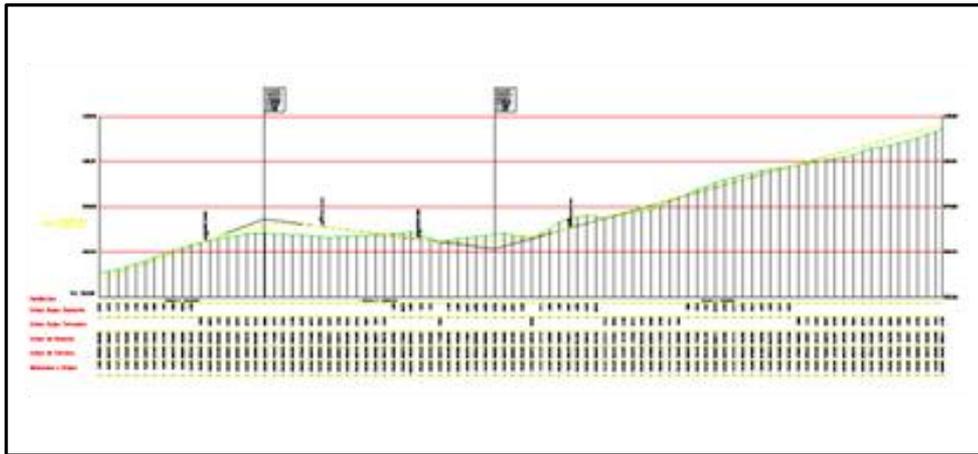
### TRAZADOS GEOMÉTRICOS.-



# 6. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

## 6.2. Explotación de las curvas de nivel

### CÁLCULO VOLUMÉTRICO DE MOVIMIENTO DE TIERRAS.-



## 6. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

### 6.2. Explotación de las curvas de nivel

#### OTRAS.-

- A. Análisis altimétricos.
- B. Determinación de cuencas de aportación.
- C. Estudio de zonas vistas y ocultas.
- D. Caracterización de trazados.
- E. Cubicación de movimientos de tierras.
- F. Análisis de pendientes.
- G. Evaluación de volúmenes por estratos horizontales.
- H. Volumen de excavación en túneles.