

Influencia de la distancia entre perfiles y de la morfología del terreno en el error cometido en el cálculo del volumen de tierras por el método de los perfiles.



Aguilar Torres, M. A.; Sánchez López, J. A.; Agüera Vega, F.; Aguilar Torres, F. J.; Carvajal Ramírez, F.
Universidad de Almería, Almería Dpto. de Ingeniería Rural.

1. Resumen

Con este trabajo se pretende determinar cómo influyen en la exactitud de la cubicación de tierras por el método de los perfiles diversos factores entre los que podemos destacar:

- Distancia de separación entre perfiles (1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 m).
- Morfología del terreno original (barranco, llano rugoso, ladera suave, llano uniforme, montañoso, ondulado).
- Método empleado para la cubicación de tierras por perfiles (área media, prismatoides).
- Obras de explanación a media ladera y obras únicamente de desmonte o terraplén.

Los puntos muestrales fueron obtenidos mediante fotogrametría digital aérea en superficies de 198x198 m, correspondiendo a superficies topográficas con morfología diferenciada y mallas muestrales regulares de 2x2 m. El análisis de la varianza de los factores estudiados, empleando como variable observada una estimación del error cometido en la cubicación de tierras empleando el método de los perfiles, nos permitió llegar a conclusiones aplicables a casos reales. El trabajo concluye con la obtención de un modelo en el que se relacionan la morfología del terreno y la distancia elegida entre perfiles, con el error cometido en la cubicación de tierras.

2. Introducción

En una gran cantidad de obras de infraestructura rural es necesaria una previa modificación del terreno original, normalmente una explanación horizontal. Este sería el paso previo para la construcción de una nave, un invernadero o una plantación abancalada. En muchas de estas obras el coste de esta modificación del terreno original, que se traduce en movimientos de tierras por exceso (desmonte) o por defecto (terraplén), supone un tanto por ciento elevado del coste total del proyecto.

La cubicación de tierras en proyectos en los que se requiere un acondicionamiento previo del terreno (explanaciones, caminos, balsas...) se ha efectuado tradicionalmente utilizando alguna de las variantes del método de los perfiles transversales (Escario y Escario, 1960; Zurita y col., 1990) en el que los perfiles se realizan a unas distancias que suelen variar entre 15 y 30 m (Aguilar y col., 1999; British Columbia, 2002). Actualmente, con la proliferación de los

modelos digitales de elevaciones (MDE), el cálculo de volúmenes de tierras se puede realizar por comparación del MDE del terreno original con el MDE del terreno modificado (Aguilar y col., 2000; Kerle, 2002).

Los objetivos de este trabajo son dos. Por un lado, comprobar la influencia que, para el cálculo de volúmenes de tierras por el método tradicional de los perfiles generados en la realización de explanaciones de plano horizontal, tienen aspectos como la morfología del terreno, la elección de la distancia entre perfiles, situación del plano de la explanación (explanaciones en desmonte, en terraplén y explanaciones a media ladera) y el método de cubicación elegido (área media o método del prismaoide). En segundo lugar se pretende elaborar un modelo empírico que relacione los factores que más afectan al error en la cubicación de tierras por el método de los perfiles.

3. Materiales y métodos

3.1. Fuentes de variación estudiadas

Para la consecución de los objetivos de este trabajo se estableció un diseño experimental de tipo factorial donde se analizaron como fuentes de variación la morfología del terreno, la distancia entre perfiles, cota de explanación y el método de cálculo (área media o prismatoides), siendo la variable observada el error cometido en la cubicación de tierras mediante el método de los perfiles. A continuación describiremos con más detalle cada una de las fuentes de variación enumeradas.

3.1.1. Morfología

Para el desarrollo de este trabajo seleccionamos 6 superficies topográficas de 198x198 m, cada una con unas características morfológicas diferenciadas. El MDE de cada superficie topográfica fue generado mediante restitución fotogramétrica digital automática y posterior revisión/edición por parte del operador. Para ello se utilizó un vuelo fotogramétrico a escala aproximada 1/5000 realizado con una cámara métrica Zeiss RMK TOP 15. Para la construcción del MDE se empleó el módulo Automatic Terrain Extraction del sistema fotogramétrico digital LH Systems SOCET SET NT v.4.3.1., obteniéndose un MDE final con estructura de malla regular (GRID), espaciamento de 2x2 m y cotas ortométricas. En trabajos anteriores realizados por nuestro grupo se detallan algunas características generales de las morfologías elegidas (Aguilar y col., 2003).

Como variable descriptora de la morfología de cada una de las 6 superficies topográficas estudiadas, se eligió la desviación estándar de los vectores unitarios normales a la superficie (DEVUN), que en trabajos anteriores ha demostrado una buena correlación con la rugosidad del terreno (Aguilar y col., 2003). Para la obtención del DEVUN (tabla 1) en cada una de las morfologías se calcularon los vectores unitarios normales a la malla regular 2x2 inicial en cada uno de sus nodos. Posteriormente se calcularon sus componentes principales en las direcciones X, Y, Z, obteniendo finalmente el DEVUN según la expresión [1]:

$$DEVUN = \sqrt{\text{var } x + \text{var } y + \text{var } z} \quad [1]$$

Los procedimientos descritos se programaron mediante el módulo Scripter®, incluido en SURFER® 8.01 (Golden Software, 2002).

Morfología	DEVUN	Morfología	DEVUN
Ladera suave	0.024	Barranco	0.285
Llano	0.034	Montaña	0.310
Llano rugoso	0.039	Ondulado	0.090

Tabla 1: Valores calculados de DEVUN para cada una de las morfologías.

3.1.2. Distancia entre perfiles

Para el cálculo del volumen de tierras necesario para la construcción de la explanación por el método de los perfiles es necesaria la representación de un número determinado de perfiles transversales, de forma que el volumen total se corresponde con la suma de los volúmenes parciales entre cada dos de estos perfiles. Se tomaron perfiles de forma que la distancia entre dos consecutivos estuviese entre un total de 11 distancias diferentes (1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 m). En cada explanación cuadrada de 198x198 m., se tomaron dos ejes longitudinales ortogonales que unían los puntos medios de cada lado de la explanación. Apoyándose en estos ejes se dibujaron los perfiles transversales que nos sirvieron para realizar la cubicación de tierras. Se tomaron 3 repeticiones por eje longitudinal y por distancia entre perfiles, obteniéndose un total de 6 repeticiones por cada una de las distancias consideradas (figura 1).

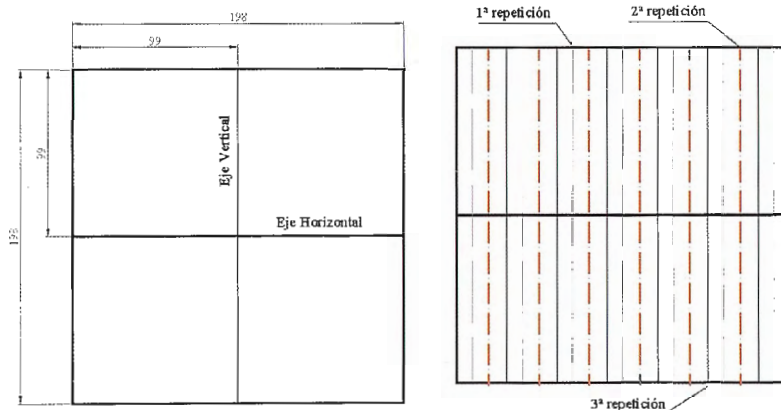


Figura 1: Disposición de los dos ejes en la explanación a la izquierda y toma de tres repeticiones en el eje horizontal a la derecha para una distancia entre perfiles de 30 m.

3.1.3. Plano de comparación

En cada una de las 6 morfologías estudiadas se realizaron los cálculos de los volúmenes de tierras, en desmonte y terraplén, necesarios para la ejecución de la explanación

cuadrada horizontal. Se eligieron 3 cotas diferentes para dicha explanación que en cada morfología coincidían con las cotas mínima, media y máxima de los 10.000 puntos que componían la malla regular del terreno original. Cuando elegimos la cota mínima para las explanaciones obtenemos exclusivamente movimientos de tierras en desmonte (puros), para cota máxima tendremos sólo terraplén (puros) y en cota media tendremos tanto desmonte como terraplén (mixtos).

3.1.4. Método de cálculo

Para realizar la cubicación de los movimientos de tierras necesarios para la construcción de una explanación horizontal por el método de los perfiles, es necesario calcular las áreas de desmonte y/o terraplén resultantes de comparar el perfil del terreno original con el perfil final de la explanación horizontal (figura 2).

Una vez obtenidas las áreas de desmonte y terraplén de cada uno de los perfiles correspondientes a una repetición, el cálculo del volumen de tierras se realizó utilizando dos métodos diferentes:

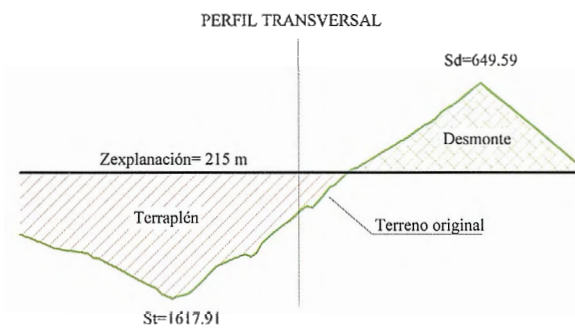


Figura 2: Ejemplo del cálculo de áreas de desmonte y terraplén en un perfil de terreno montañoso con una explanación situada a cota media.

a) Método del área media, con el que se determina el volumen entre dos perfiles consecutivos multiplicando la distancia que los separa por la semisuma de la superficie de tierra en desmonte o terraplén obtenidos en esos dos perfiles (Zurita y col. 1990). Ecuaciones [2] y [3].

$$Vd = \left(\frac{Sd_1 + Sd_2}{2} \right) * d \quad [2] \quad Vt = \left(\frac{St_1 + St_2}{2} \right) * d \quad [3]$$

Donde: Vd =volumen de desmonte; Vt =volumen de terraplén; $Sd1$ y $Sd2$ =superficies de desmonte en los perfiles 1 y 2; $St1$ y $St2$ =superficies de terraplén entre los perfiles 1 y 2; d =distancia entre perfiles.

b) Método del prismaoide, que considera el volumen entre perfiles como el de un prismaoide, con sus caras constituidas por triángulos que unen sus vértices (Zurita y col., 1990). En este caso se determinará su volumen utilizando la superficie de la sección

media y de las extremas de cada tres perfiles transversales. De esta forma el cálculo del volumen de tierras entre el perfil 1 y el 3 respondería a la expresión [4], mientras que el desarrollo de n perfiles se calcularía mediante la ecuación [5] diferenciando perfiles pares e impares, siendo d , la distancia entre perfiles y Si , la superficie en el perfil i .

$$V = \frac{2*d}{6} (S_3 + S_1 + 4S_2) \quad [4] \quad V = \frac{2*d}{6} (4S_{\text{pares}} + S_n + S_1 + 2S_{\text{impares}}) \quad [5]$$

Para realizar los cálculos de volúmenes de tierras por perfiles, tanto por el método del área media, como por prismatoides se utilizó el programa MDT v 3.5 (Navarrete, 2002).

3.2. Obtención de la variable dependiente

La variable observada y dependiente de las fuentes de variación descritas anteriormente fue el error cometido en la cubicación de tierras, expresado en m³ por m² de superficie de explanación horizontal (diferenciando superficie de desmonte y superficie de terraplén), mediante el método de los perfiles. Para la obtención de este error debíamos comparar el volumen obtenido en la cubicación de tierras por el método tradicional de los perfiles con el volumen movido realmente. Como estimación del volumen real se realizó el cálculo de volúmenes de tierras por diferencia de la malla regular del terreno original con el plano horizontal de la explanación. Debido a la alta densidad de la malla (2x2 metros) y a la elevada precisión en la obtención de los 10.000 puntos que la forman, el volumen así calculado constituye una buena aproximación al volumen real.

Para el cálculo de la aproximación del volumen real se utilizó SURFER® 8.01 (Golden Software, 2002), que emplea la regla trapecoidal, la de Simpson y la 3/8 de Simpson para la cubicación de los movimientos de tierras. Las diferencias entre estos tres métodos son prácticamente nulas cuando empleamos un número de puntos elevado.

3.3. Análisis estadístico

En el estudio estadístico de los datos obtenidos en el diseño factorial empleado en este trabajo, se empleó el paquete estadístico STATGRAPHICS plus 4.0 (Statistical Graphics Corp.) para realizar el análisis general de la varianza, utilizando el Test de rango múltiple de Duncan para la separación de medias. Con las 6 morfologías, 11 distancias entre perfiles, 3 cotas de explanación, 2 métodos de cálculo y 6 repeticiones, se generaron en principio un total de 3168 datos de errores de cubicación de tierras mediante el método de los perfiles (teniendo en cuenta que con el plano de comparación a cota media se generan el doble de datos que en los casos de cota mínima y máxima, ya que en explanaciones a media ladera se producen movimientos de tierra en desmonte y terraplén).

Sobre el total de los datos (3168 datos) se realizó un filtro de "blunders" mediante el método "3 sigma" (Daniel y Tennant, 2001). Este consistió en eliminar los datos de error (m³/m²) cometido en la cubicación de tierras por el método de los perfiles, que quedaban fuera del intervalo 3 (media de cada caso, reduciéndose finalmente el total a 1777 datos).

3.4. Modelización de los resultados

Se intentará obtener un modelo matemático que intente explicar el error en la cubicación de tierras, expresado en m³ de tierras a mover por m² de superficie plana de explanación sometida a desmonte o terraplén, mediante la introducción de aquellas variables estudiadas en este trabajo que resulten más determinantes. Para la obtención de este modelo se ha realizado una regresión no lineal estimada mediante el método de Marquardt.

4. Resultados y discusión

En las tablas 2 y 3 se presentan los resultados del análisis de la varianza (ANOVA) de los factores evaluados, expresándose la variable observada como m³ de tierras a mover por m² de explanación sometida a desmonte o terraplén. Hemos diferenciado 2 análisis, uno pertenece a los perfiles puros de desmonte y terraplén (tabla 2) y otro a los perfiles mixtos a media ladera (tabla 3). Podemos comprobar cómo la distancia entre perfiles es el factor que más influye en los errores cometidos (m³/m²), seguido muy de cerca por la morfología del terreno. Con respecto al método de cálculo debemos resaltar que cuando se trate de explanaciones únicamente de desmonte o terraplén (perfiles puros) el método de cálculo elegido tendrá una influencia casi nula, todo lo contrario de lo que ocurre cuando se trate de explanaciones a media ladera (perfiles mixtos).

Tabla 2: Influencia de las distintas fuentes de variación estudiadas para perfiles puros sobre el error cometido en la cubicación de tierras expresado en m³ por m² de superficie plana de explanación sometida a desmonte o terraplén (g.l: grados de libertad, s. c.: suma de cuadrados, F: estadístico F).

Fuentes de variación	g. l.	s. c.	F	Probabilidad
(1) Distancia perfiles	10	1.271	86.48	p<0.01
(2) Morfología (DEVUN)	5	0.548	74.59	p<0.01
(3) Método cálculo	1	1.8x10 ⁻⁶	<0.001	p=0.972
Residuos	810			

Tabla 3: Influencia de las distintas fuentes de variación estudiadas para perfiles mixtos sobre el error cometido en la cubicación de tierras expresado en m³ por m² de superficie de explanación en desmonte o terraplén (g.l: grados de libertad, s. c.: suma de cuadrados, F: estadístico F).

Fuentes de variación	g. l.	s. c.	F	Probabilidad
(1) Distancia perfiles	10	2.824	86.45	p<0.01
(2) Morfología (DEVUN)	5	1.196	73.24	p<0.01
(3) Método cálculo	1	0.0191	5.85	p=0.0156
Residuos	933	3.0473		

La tabla 4 nos muestra un importante incremento del error medio cometido en la cubicación de tierras cuando trabajamos con perfiles a media ladera. Este error aumenta de forma potencial con la distancia entre perfiles (figura 3).

Tabla 4: Influencia del método de cálculo sobre el error cometido en la cubicación de tierras expresado en m³ por m² de superficie de explanación. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (p<0.05).

Método cálculo	Perfiles	Error Cubicación (m ³ /m ²)
Área media	Puros	0.0335 a
Prismatoides	Puros	0.0336 a
Área media	Mixtos	0.0459 a
Prismatoides	Mixtos	0.0549 b

La sobreestimación en el cálculo de volúmenes de tierras por perfiles en explanaciones a media ladera (independientemente del método de cálculo empleado), se debe a la existencia de una o varias línea/s de paso, en las que se produce un cambio entre desmonte y terraplén, y sobre las que no se han trazado necesariamente perfiles transversales.

Por tanto, para hacer un ajuste del modelo empírico más acorde con la realidad, utilizaremos únicamente los datos de los errores obtenidos en la cubicación de tierras por perfiles generados en explanaciones en desmonte o terraplén (perfiles puros).

En la figura 4 se representa el error en la cubicación de tierras expresado en m³ por m² de superficie plana de ex-

planación en desmonte o terraplén frente a la distancia entre perfiles para cada morfología en el caso de explanaciones puras.

Las curvas ajustadas al conjunto de datos de cada morfología son potenciales, presentando un alto coeficiente de regresión ($0.99 > r^2 > 0.93$). Parece apreciarse una relación directa entre la irregularidad de la morfología del terreno y los errores presentados en la cubicación de tierras.

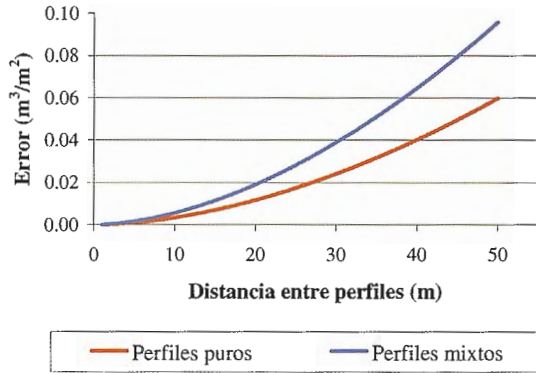


Figura 3: Variación del error en la cubicación de tierras por m³/m² de explanación, diferenciando explanaciones mixtas (desmonte y terraplén) y explanaciones puras (desmonte o terraplén).

Tras este análisis de resultados abordamos el segundo de los objetivos de este trabajo, que será la obtención de un modelo que relacione las fuentes de variación más importantes: distancia entre perfiles (dist) y la morfología del terreno (expresada mediante la variación de las componentes de los vectores unitarios perpendiculares a la superficie, DEVUN), con el error en la cubicación de tierras expresado en m³ de tierras a mover por superficie de la explanación sometida a desmonte o terraplén (m²). Se ha utilizado el modelo empírico que se expone en la expresión [8]:

$$Error = (a * dist^b) * (c * DEVUN^d) \quad [8]$$

Con este modelo se pretende dar una respuesta práctica a algunas cuestiones que se podría plantear el técnico que se enfrenta a la construcción de una explanación de plano horizontal: ¿qué distancia entre perfiles transversales debería tomar en una explanación realizada sobre un terreno con una determinada morfología (DEVUN), para cometer un error en la cubicación de tierras expresado en m³ por m² de superficie de explanación, inferior al requerido?.

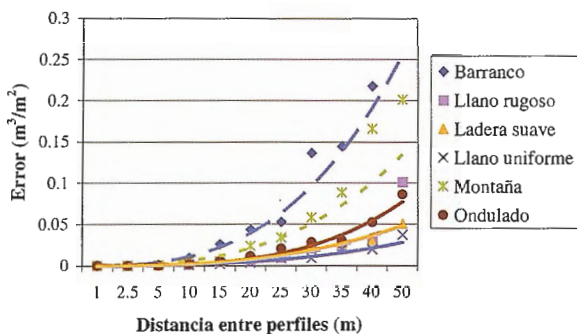


Figura 4: Variación del error (m³/m²) en la cubicación de tierras respecto a la distancia entre perfiles para cada morfología, para explanaciones puras.

Para dar respuesta a esta cuestión se ha generado un modelo empírico para explanaciones puras en desmonte o

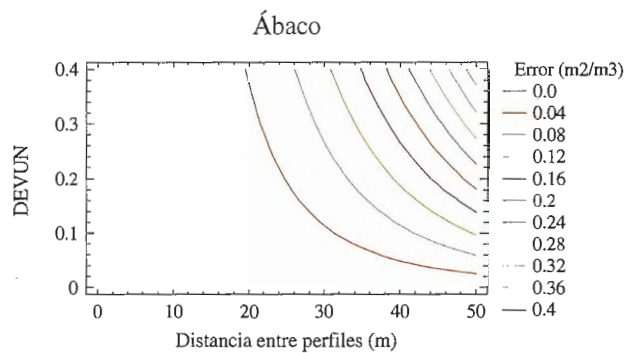
terraplén, basado en datos experimentales que responden a la ecuación [8]. Los coeficientes de ajuste y el coeficiente de regresión aparecen en la tabla 5.

En la figura 5 se presenta el modelo obtenido para explanaciones puras en forma de ábaco, permitiendo realizar la toma de decisiones de forma gráfica.

Tabla 5: Coeficientes obtenidos en el ajuste del modelo por regresión no lineal y coeficientes de regresión obtenidos para explanaciones puras.

Modelo experimental [6] experimental/empírico [6]	a	b	c	d	r ²
Explanaciones Puras	0.0008	2.4044	0.0818	0.82	0.84

Figura 5: Modelo que relaciona la morfología (DEVUN) y la distancia entre perfiles con el error en la cubicación por m³ de superficie explanada en desmonte o terraplén para explanaciones puras.



5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo nos permiten extraer las siguientes conclusiones:

- Si aplicamos perfiles sin tener en cuenta la línea de paso, el método del área media resulta ser más exacto que el de los prismatoides, en la cubicación de tierras por perfiles transversales en explanaciones a media ladera.

Si las explanaciones son puras en desmonte o terraplén, no hay diferencias entre ambos métodos.

- En explanaciones a media ladera cometeremos mayor error en la cubicación de tierras que en explanaciones de desmonte o terraplén puras, a no ser que intensifiquemos el número de perfiles en la zona próxima a la línea de paso o que hagamos coincidir un perfil con esta línea de paso.

- Hay una relación potencial clara entre la distancia entre perfiles y el error cometido en la cubicación de tierras por el método de los perfiles, para cada una de las 6 morfologías empleadas.

Por otro lado, la variable morfología también tiene un peso importante en el error cometido en el cálculo de volúmenes.

Estos errores aumentan a medida que lo hace la rugosidad del terreno.

- Se puede realizar una modelización del error cometido en la cubicación de tierras por perfiles en función de la morfología del terreno (DEVUN) y la distancia entre perfiles en explanaciones de desmonte o terraplén.

La representación en forma de ábaco de éste modelo puede ayudar a la hora de decidir la distancia entre perfiles transversales en un determinado proyecto de explanación.

Estos primeros resultados, aunque bastante interesantes desde el punto de vista práctico, necesitan de futuros trabajos para su consolidación definitiva.

Entre ellos podemos destacar la validación del modelo obtenido, o estudiar otros factores que por simplificar el proceso se han obviado en este primer estudio, como por ejemplo la influencia de la consideración de taludes o la adaptación a obras lineales (caminos).

6. Agradecimientos

A la Empresa Pública para el Desarrollo Agrario y Pesquero de Andalucía (D.a.p) por permitirnos el uso de la cartografía digital a escala 1:1.000 de la comarca de Níjar (Almería).

7. Referencias Bibliográficas

Aguilar, M.A., Carvajal, F., De Haro, J.M., Aguilar, F.J., Agüera, F., Gálvez, M.J., Modelo tridimensional del terreno. Aplicación al control de volúmenes de tierras realizados en las obras de restauración medioambiental de una zona minera. Mapping, nº 66, pp. 12-18, 2000.

Aguilar F.J., Agüera F., Carvajal F., Fundamentos para el diseño gráfico de maquinaria e industrias agrarias., Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería, 1999.

Aguilar, F.J., Agüera, F., Aguilar, M.A., Carvajal, F., Sánchez, P.L., La calidad de los modelos digitales de elevaciones con estructura de matriz regular. Análisis y modelización. Actas del XV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Nápoles-Salerno, Italia, pp. 188, 2003.

British Columbia Ministry of Forest, Forest road engineering guidebook 2nd ed. Forest Practices Code of British Columbia, 2002.

Daniel, C., Tennant, K., 2001. DEM quality assesment. En: The DEM Users Manual (D.F. Manue, editor). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda, Maryland, pp. 395-440.

Escario, J.L., Escario, V., 1960. Caminos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

Golden Software, Inc. Surfer 8 Users' guide, Golden Software Inc., Colorado, 2002.

Kerle, N., Volume estimation of the 1998 flank collapse at casita volcano, Nicaragua: A comparison of photogrammetric and conventional techniques. Earth Surf. Process. Landforms nº 27, pp. 759-772, 2002.

Navarrete, F., MDT version 4. Potencia y facilidad de uso. Mapping, nº 80, pp. 35-39, 2002.

Zurita, E., Herráez, E., Arias, J.L., Modelado gráfico del terreno. Explanaciones. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola, Lugo, 1990.

" LA TIENDA VERDE "

SANTANDER

C/ MAUDES Nº 38 - TLF. (91) 534 32 57

C/ MAUDES Nº 23 - TLF. (91) 535 38 10

Fax. (91) 533 64 54 - 28003 MADRID

"LIBRERIA ESPECIALIZADA EN CARTOGRAFIA, VIAJES Y NATURALEZA"

- 
- The map shows the geographical outline of Spain with several cities marked by colored dots: SANTANDER, PALENCIA, ZAMORA, SEGOVIA, MADRID, TOLEDO, CÁDIZ, CIUDAD REAL, JAÉN, SEVILLA, GRANADA, and MÁLAGA. The list of map types is overlaid on the map.
- MAPAS TOPOGRAFICOS: S.G.E. I.G.N.
 - MAPAS GEOLOGICOS.
 - MAPAS DE CULTIVOS Y APROV.
 - MAPAS AGROLOGICOS.
 - MAPAS DE ROCAS INDUSTRIALES
 - MAPAS GEOTECNICOS.
 - MAPAS METALOGENETICOS.
 - MAPAS TEMATICOS
 - PLANOS DE CIUDADES.
 - MAPAS DE CARRETERAS.
 - MAPAS MUNDIS.
 - MAPAS RURALES.
 - MAPAS MONTADOS EN BASTIDORES.
 - FOTOGRAFIAS AEREAS.
 - CARTAS NAUTICAS.
 - GUIAS EXCURSIONISTAS.
 - GUIAS TURISTICAS.
 - MAPAS MONTAÑEROS.
- www.tiendaverde.org

"VENTA DIRECTA Y POR CORRESPONDENCIA"

"SOLICITE CATALOGO"