

MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES (MDE) PARA LA CARACTERIZACIÓN ALTIMÉTRICA DE ESPACIOS MARISMEÑOS: LAS MARISMAS DEL ODIEL (HUELVA, ESPAÑA)

J. Ojeda Zújar y J. Márquez Pérez

Grupo de Investigación: Ordenación del Litoral y Tecnologías de Información Territorial. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Sevilla. C/ María de Padilla s/n. Sevilla 41004

Resumen: Las Marismas del Odiel están situadas en la costa de Huelva (España). Ubicadas en una costa mesomareal, pertenecen al tipo de marismas mareales y, debido a su peculiar topografía, su caracterización altimétrica es compleja y no se ve adecuadamente reflejada por los métodos utilizados para su representación en las fuentes de información altimétrica habituales. Este artículo propone una metodología que permite la adecuada caracterización altimétrica de los espacios marismesños con un coste mínimo. Mediante la integración y manipulación de datos relacionados, directa o indirectamente, con la altimetría en un Sistema de Información Geográfica (Arc-Info PC), se genera un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) donde esta altimetría es considerada como una variable espacial continua. El resultado es una caracterización altimétrica muy superior en calidad a la proporcionada por la generación de un MDE a partir exclusivamente de los datos aportados por la cartografía clásica publicada. Esta mejora se basa en tres elementos claves: (i) análisis previo de las características geomorfológicas del espacio a modelar, (ii) utilización de la vegetación marismesña como un indicador altimétrico, y (iii) la incorporación de *líneas de estructura* como elementos que permiten controlar la integración de los datos en el proceso de generación del MDE.

Palabras clave: marismas mareales, modelo digital de elevaciones, líneas de estructura, sistemas de información geográfica, teledetección.

Abstract: The Marismas del Odiel are found on the meso-tidal coast of Huelva (Spain). They are characterized as salt marshes and, due to their special topography, their altimetric characterization is complex and not very well illustrated by traditional topographic sources (maps). This article proposes a cost-saving methodology for their altimetric characterisation utilising data that are related directly or indirectly with altimetry to create a Digital Elevation Model (DEM) which considers altimetry as a continuous surface. The results show improvements on DEM's generated solely with data derived from classical topographic maps. These improvements are related to three points: (i) the previous geomorphological analyses of the area; (ii) the use of vegetation as an altimetric indicator; and (iii) the integration of *structure lines* to control the process of DEM generation.

Key words: salt marshes, digital elevation model, structure lines, geographic information systems, remote sensing.

Ojeda Zújar, J. y Márquez Pérez, J. (1997): Modelos digitales de elevaciones (MDE) para la caracterización altimétrica de espacios marismesños: las Marismas del Odiel (Huelva, España). *Rev. Soc. Geol. España*, 10 (1-2): 147-161.

Durante los últimos años se asiste a una preocupación general acerca de los cambios que parece experimentar el clima de nuestro planeta. Una consecuencia particularmente importante de estos cambios sería la elevación del nivel medio del mar ligado al efecto invernadero, con implicaciones medioambientales evidentes en áreas potencialmente sensibles como son las marismas mareales (Boorman *et al.*, 1989; Bijlsma *et al.*, 1992).

La evaluación de las consecuencias de una subida del nivel del mar en espacios marismesños requiere el conocimiento de distintos factores y elementos. Entre

estos últimos, la altimetría de la zona intermareal y supramareal es un elemento clave ya que nos permitiría relacionar directamente el aumento del nivel del mar con la topografía del área objeto de estudio. Es así posible conocer dónde se situaría el límite de las áreas afectadas por la inundación o por los diferentes niveles críticos de la marea al ser proyectados éstos, como isolíneas, sobre un modelo altimétrico de la zona de estudio. En este sentido, y con un carácter general, puede afirmarse que los procesos de inundación en espacios marismesños están sensiblemente controlados por sus características altimétricas, a las que habría que

unir el efecto de los procesos de subsidencia y/o sobreelevaciones, así como la incidencia local o general de las tasas de sedimentación.

Debido a sus peculiares características topográficas (situación en la franja intermareal, leves diferencias altimétricas, pequeños pero bruscos cambios de pendiente...), la caracterización altimétrica de las marismas, en apariencia simple, es bastante compleja y no se ve adecuadamente reflejada por los métodos utilizados para su representación en las fuentes de información altimétrica habituales, donde generalmente se realiza a través de isolíneas y cotas.

Este artículo propone una metodología que permite una caracterización altimétrica más precisa de estas áreas, minimizando costes en términos de tiempo empleado en la recogida de datos y en su procesamiento, mediante la integración y manipulación de datos relacionados directa o indirectamente con la altimetría (vegetación, red de drenaje, curvas de nivel, cotas...) en un Sistema de Información Geográfica (Arc-Info PC). Este *software* manipulará los datos morfométricos disponibles y, mediante los adecuados procedimientos de triangulación integrados en un paquete específico de aplicaciones (Structural Elevation Model, SEM), intentará generar un modelo digital de elevaciones (MDE) lo más adaptado posible a la configuración topográfica de estos espacios.

El MDE, al tratarse de una superficie continua, incluye información altimétrica suficiente para caracterizar todos los elementos relevantes de la morfología y topografía de los espacios marismas, a la vez que proporciona la continuidad altimétrica necesaria, tanto para entender y correlacionar diferentes variables físico-naturales como para realizar una evaluación de las consecuencias de una potencial subida del nivel del mar. Es necesario, sin embargo, subrayar que en este artículo no serán tratados los procedimientos dirigidos a una completa evaluación de las consecuencias de una subida del nivel del mar en espacios marismas (objetivo genérico de un proyecto de investigación más amplio en el que este artículo se inserta)¹, sino tan sólo aquellos aspectos metodológicos relacionados con la generación de información altimétrica necesaria para este tipo de evaluaciones.

Problemática asociada a la generación de un MDE en zonas de marisma

Un modelo digital de elevaciones se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud sobre la superficie del terreno. La unidad básica de información en un MDE es un valor de altitud z al que acompañan los valores correspondientes de las coordenadas x e y , expresadas

en un sistema de proyección cartográfica para su precisa representación espacial. El diseño de las interrelaciones entre estas unidades elementales de información es lo que configura las diferentes opciones en la estructura de datos para representar de forma continua una superficie topográfica (Felicísimo, 1994).

La información altimétrica y los métodos para establecer una estructura continua de datos altimétricos a partir de datos discontinuos son los dos elementos básicos para la realización de un MDE. La principal tarea de estos métodos es la de organizar el espacio por medio de una malla o red de elementos geométricos, regulares o no. Posteriormente, a partir de la información altimétrica disponible y mediante una función de interpolación, se estiman elevaciones en localizaciones donde no hay datos, contribuyendo así a la descripción de una superficie continua. Por otra parte, la cartografía topográfica, las técnicas fotogramétricas y el trabajo de campo son las fuentes de información altimétrica usuales para la adquisición de datos, mientras las técnicas de organización del espacio pueden ser clasificadas de diferentes formas, generalmente en función del modelo y estructura de los datos a los que se aplique.

Las técnicas de organización del espacio y la función de interpolación a utilizar para generar un MDE dependen en gran parte de la topografía de la zona que se pretende representar. En el caso de los espacios marismas nos encontramos con unas características morfológicas especiales que se pueden sintetizar en áreas extensas de altimetría homogénea o con variaciones muy leves (planicies intermareales) y elementos que introducen alteraciones altimétricas bruscas pero de escasa entidad espacial (pequeños canales, microescarpes, *levees* o pozas hipersalinas). A esta escasa altimetría se suma la presencia de una tupida vegetación que cubre los niveles superiores, en la mayoría de los casos con una altura superior a los cambios microtopográficos de la superficie del terreno. Estas características morfológicas conllevan una problemática especial que hace que su caracterización morfométrica no sea fácil de obtener con las fuentes de información habituales, y que los tipos de estructura de datos y los algoritmos de interpolación adecuados queden restringidos a aquellos capaces de representar, con suficiente fidelidad, sus particulares características topográficas.

Las fuentes de información altimétrica

En la cartografía topográfica disponible en nuestro país, la representación convencional de la altimetría a través de isolíneas y puntos acotados no está especialmente adaptada a las características físico-naturales de las áreas costeras en general, y a las áreas estuarinas y marismas en particular, afirmación que puede exten-

¹ Los resultados de este artículo se insertan en un Proyecto de Investigación más amplio financiado por la Agencia de Medio Ambiente de Andalucía, centrado en la evaluación de los impactos de una potencial subida del nivel del mar en espacios marismas protegidos (Programa de seguimiento de la dinámica y calidad del Medio Litoral).

derse a las series cartográficas disponibles más detalladas, la mayor parte de las cuales han superado los niveles estandarizados de precisión (escalas 1:10.000 ó 1:5.000). En este sentido pueden señalarse una serie de problemas, unos de carácter general y otros exclusivos de las zonas costeras:

a) las isolíneas representadas suelen generarse a partir de una generalización de la información original, independientemente de la técnica utilizada para su determinación (taquimetría, GPS, fotogrametría, etc.).

b) desde una perspectiva espacial, se produce una redundancia de información altimétrica en las isolíneas, mientras que las zonas que se hallan entre ellas carecen de suficientes datos.

c) en el caso de zonas costeras, y concretamente en las áreas marismas, la situación de la primera isolínea (que incluso en las escalas de mayor detalle se sitúa a 2 ó 5 m) no permite una adecuada representación morfológica de estos espacios, ya que en su mayor parte su variabilidad altimétrica se encuentra por debajo de estas cotas.

d) en esas zonas se dispone tan solo de una limitada representación de la zona intermareal, ya que las curvas de nivel comienzan con el cero topográfico. Utilizar como dátum altimétrico el nivel medio del mar en Alicante representa una ausencia de información altimétrica esencial para los niveles inferiores de los espacios marismas, sobre todo en costas meso y macromareales.

e) la posición de las cotas no es aleatoria ni va dirigida a una adecuada caracterización de la topografía de estos espacios ya que, al estar condicionada por la presencia de la vegetación, las cotas se dan donde ésta lo permite.

f) por último, la línea de costa recogida en la cartografía no es homogénea y, la mayor parte de las veces, debido al dinamismo de estos espacios, aparece insuficientemente actualizada.

Debido a que las técnicas fotogramétricas realizan la modelización estereoscópica basándose en los elementos recogidos fotográficamente sobre la superficie del terreno, estas técnicas encuentran una gran dificultad para asignar valores altimétricos ante la presencia de la tupida cubierta vegetal, característica de las áreas superiores de estos espacios. Esta vegetación, que cubre la topografía infrayacente, imposibilita por esta vía la adecuada caracterización altimétrica de la superficie del terreno, quedando restringida a la red de canales, llanuras mareales no vegetadas, y cotas aisladas en espacios descubiertos.

La topografía de campo permite la obtención de altimetría sobre cualquier punto de la marisma, si bien no es uno de los lugares más accesibles a este tipo de levantamiento (zonas pantanosas, oscilaciones de la marea...). Por otra parte, las técnicas de levantamiento tradicionales, sobre todo si se realizan a través del establecimiento de transectos regulares, conducirían a la obtención de información excesivamente redundante y, sin embargo, podrían dejar escapar elementos de pe-

queña entidad espacial (*levees*, microescarpes, pozas...) pero de gran importancia en la caracterización morfológica de las marismas, ya que son uno de sus principales elementos geomorfológicos.

Modelo y estructura de datos. Métodos de interpolación

Los criterios más importantes para la selección del modelo y estructura de los datos son, por una parte, tener en cuenta las características morfológicas del terreno y, por otra, evaluar la capacidad de la función de interpolación para adaptarse a las características de éste (Weibel y Heller, 1991). Los elementos morfológicos del relieve que se consideran esenciales en nuestro caso son aquéllos que rompen de una forma relativamente brusca la continuidad de una superficie. Concretamente en los espacios marismas, son los canales de drenaje, pozas salinas, microescarpes y *levees*. Debido a que una parte importante de estas funciones de interpolación tienden a crear una superficie en la que la continuidad no se quiebra de forma repentina, y a que no tienen en consideración las características específicas de la superficie a modelar, la elección de la función de interpolación adecuada es de crucial importancia. Es, por tanto, necesario seleccionar un método apropiado para representar las formas y elementos geomorfológicos que se dan en espacios con las características de las marismas, en los que abundan cambios altimétricos leves pero relevantes, junto a amplias superficies de topografía muy homogénea.

El modelo de datos *raster* y sus tipos de estructura permiten una adecuada representación de la forma general de la superficie en áreas de fuerte relieve, pero resultan menos eficientes para la definición de detalle en áreas de relieve más homogéneo (Carter, 1989). En este modelo, el espacio es subdividido en celdillas de igual tamaño y es asignado el valor altimétrico al centro o a la esquina de cada una de ellas. No resulta, por ello, muy adecuado para la representación de zonas en las que el tamaño de las discontinuidades es tan pequeño que se precisaría un tamaño de celdilla igual o inferior a éstas y, por tanto, un enorme número de celdillas para caracterizar la zona. Los métodos de división recursiva del espacio (*quadtree*) aportan una solución a este problema al ajustar, de forma variable, el tamaño de la celdilla al objeto a representar. Sin embargo, algunas funciones de interpolación utilizadas en este modelo de datos (medias móviles, superficies de tendencia, *krigging*...) no suelen respetar, en algunos casos, los valores altimétricos originales. Es decir, la superficie representada no se ajusta de forma correcta a todos los puntos cuya información original fue obtenida sobre el terreno o a través de alguna otra fuente de información. Por otro lado, tampoco ofrecen la posibilidad de integrar de forma fácil líneas que representen características morfológicas o cambios topográficos, o que permitan controlar los procedimientos de interpolación. Por lo tanto, el modelo de datos *raster* exigiría la utilización de matrices altimétricas muy de-

talladas y de difícil manipulación, o la utilización de métodos de división recursiva del espacio diseñados de forma precisa. Aún así, dado que los datos de partida sólo ocasionalmente coinciden con el centro o las esquinas de la celdilla de la matriz, introducen siempre un proceso de interpolación adicional para llevar la altura de los puntos originales a estas posiciones en la matriz altimétrica.

De los métodos basados en modelos de datos vectoriales, el tipo de estructura de datos conocido como Red de Triangulación Irregular (*Triangular Irregular Network*, TIN) ofrece un modo adecuado de representar las formas del terreno de las marismas, ya que tiene 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 manejable (Brändli, 1991). Para ello, los datos que representan la topografía de la superficie son organizados de dos formas: con una serie de puntos (con información x , y , z) y con una red de triángulos que los conectan con sus vecinos. Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, definiendo un conjunto de triángulos irregulares adosados, donde cada triángulo es considerado como una faceta de la superficie a representar. La complejidad de la red de triángulos aumenta donde la información es más densa (ver ejemplo en figura 9), por lo que es posible representar con mayor fidelidad el carácter variable del terreno sin tener que almacenar un gran volumen de información redundante. Un número importante de programas informáticos que utilizan este tipo de estructura emplean el método Delaunay para generar un tipo de red en la que estos triángulos son lo más equiláteros posible (McCullagh y Ross, 1980), por lo que la estructura tiende a la regularidad. Por otra parte, los métodos de interpolación apoyados en la red de triángulos se basan en la interpolación *lineal* dentro de cada triángulo o bien en la interpolación *bezier*, realizada por medio de una *aproximación cuadrática* dentro de cada una de las doce subdivisiones realizadas en cada triángulo básico (ESRI Germany, 1991). Con ello se consigue una superficie mucho más suavizada, si bien este algoritmo de interpolación, aunque mejore la visualización del modelo, puede introducir alturas no deseadas. Las principales ventajas del modelo vectorial son, junto a la eliminación de información redundante, la conservación de los valores originales, es decir, la superficie representada puede ajustarse a todos los puntos con información altimétrica original y también, especialmente en nuestro caso, la posibilidad de integrar las conocidas en la terminología SIG como *líneas de estructura*. Estas *líneas* representan elementos morfológicos que rompen la continuidad de la superficie (microescarpes, cambios de pendiente...). Son consideradas *estructurales* ya que, al convertirse automáticamente en límites de triángulos, permiten evitar la interpolación entre determinados elementos, ayudando a controlar la triangulación. Además, sus valores altimétricos pueden ser de un tipo distinto a los aportados por las isóneas: lí-

neas con valores altimétricos discontinuos (red de drenaje) o distinta altimetría a ambos lados de una línea (escarpes verticales...), por lo que constituyen un instrumento de gran interés en la generación de un MDE (McCullagh, 1988). En algunos casos, estas líneas pueden incluso no incluir valores altimétricos, sino exclusivamente información sobre una ruptura de pendiente que es respetada en la interpolación.

Metodología

Dadas las características altimétricas y morfológicas de las zonas de marisma, la creación de un modelo digital que las represente con precisión exige, desde nuestro enfoque metodológico, tanto una labor previa de valoración cualitativa y definición de sus elementos geomorfológicos más representativos (*caracterización geomorfológica*) como una *caracterización altimétrica* de los mismos dirigida por el análisis anterior. Es decir, se trata de tomar valores altimétricos donde éstos sean realmente representativos. Culminada esta fase, es igualmente necesario aplicar algún tipo de control en los procesos de interpolación para garantizar la representatividad de la modelización de la superficie que definirá el MDE resultante (*integración de datos y generación del MDE*). En todos los casos, el concepto de *línea de estructura* es básico, ya que son estas líneas las que permitirán la integración de pequeños detalles (en general, rupturas bruscas de pendiente) fundamentales para la representación de las principales características morfológicas de los espacios marismesños. Desde una perspectiva metodológica, se plantea una aproximación en tres fases:

Caracterización geomorfológica

La caracterización geomorfológica de los elementos del relieve que definen la topografía de los espacios marismesños se puede resumir, de forma sintética, en: (i) planicies intermareales, vegetadas o no (marismas alta, media y baja, llanuras mareales fangosas, etc.), las cuales suelen presentar una morfología plana o levemente inclinada; (ii) red de canales mareales, tanto principales como secundarios, cuya morfología puede ser variada; (iii) elementos morfológicos de menor entidad espacial pero de gran transcendencia en el funcionamiento morfodinámico de estos espacios (microescarpes, *levees*, pozas hipersalinas, etc...). La caracterización geomorfológica de cada tipo específico de elemento del relieve se realizó mediante la fotointerpretación de fotografías aéreas, apoyada en visitas de campo y, en algunos casos, en la cartografía disponible. En este sentido, la disponibilidad de vuelos en infrarrojo color ha demostrado ser de gran utilidad por su sensibilidad a la presencia de vegetación y a las variaciones de humedad. Esta fase es fundamental para la identificación de elementos que funcionarán a modo de *líneas de estructura*, especialmente aquellos relacionadas con la red de drenaje (*levees*, canales...), ya que es ésta la que, fundamentalmente, articula a las plani-

cies intermareales.

Caracterización morfométrica

La caracterización morfométrica de los elementos y unidades morfológicas se realiza mediante la selección y aplicación del mejor método o fuente para obtener su planimetría y altimetría. Para obtener la altimetría de cada tipo de elemento o unidad morfológica, las fuentes de información o el método utilizado pueden aplicarse de forma distinta: en las planicies intermareales, dadas las dificultades que impone la vegetación a la restitución fotogramétrica, se propone realizar un proceso de fotointerpretación sobre fotografías aéreas (infrarrojo color, si es posible) que permita delimitar zonas de altura homogénea (dentro de un rango) utilizando la vegetación como un indicador altimétrico y, posteriormente, llevar a cabo un trabajo topográfico de campo que ayude a asignar la altimetría a estas zonas. En la red de canales puede llevarse a cabo, en el caso de no disponer de restitución fotogramétrica de precisión, un proceso de interpretación morfológica que establezca tipologías y la asignación de altura con apoyo de campo selectivo en cada tipo. Para las pozas y los *levees*, es posible seguir un procedimiento parecido al caso anterior. De esta forma se minimiza el costoso trabajo topográfico de campo, al centrarse exclusivamente en puntos o sectores significativos morfológicamente.

Integración de los datos altimétricos para generar el Modelo digital de elevaciones (MDE)

Una vez integrados los datos altimétricos en un Sistema de información geográfica (SIG), el cual permite manipular tanto la información cualitativa (morfología) expresada en parte por las *líneas de estructura* como la cuantitativa (valores altimétricos), se procede a la generación del MDE utilizando un modelo de datos vectorial. La estructura TIN se considera adecuada. En esta fase, dada la necesidad de guiar y controlar los procedimientos de interpolación, se propone una secuencia que comienza modelando las unidades más extensas, para ir posteriormente integrando, de forma secuencial, los elementos morfológicos menores y terminar con la introducción de la red de drenaje. Este proceso secuencial garantiza un importante control sobre la interpolación, a la vez que permite ir corrigiendo errores, al identificarlos con mayor facilidad. De esta forma, la integración de la información altimétrica se realizará en tres fases:

- Construcción de un primer MDE, generado con la información altimétrica extraída para la caracterización de las planicies intermareales.
- Introducción en el MDE de *líneas de estructura* que representen a las pozas, *levees*, y márgenes de los principales canales de marea.
- Inserción de la red de drenaje como *línea de estructura* e integración de nuevas líneas, paralelas a las anteriores (*buffers*) que, funcionando igualmente como *líneas de estructura*, controlen y garanticen el proceso de triangulación con las unidades adyacentes.

Aplicación y resultados de la metodología propuesta en el área de estudio: las Marismas del Odiel (Huelva)

El área de estudio se sitúa en el sector meridional del «Paraje Natural de las Marismas del Odiel» (Fig.1). Sus coordenadas geográficas vienen definidas por los límites de la hoja nº 999 (6-8), escala 1:5.000, perteneciente al Mapa Topográfico del Litoral Andaluz (Instituto de Cartografía de Andalucía, ICA). Este área ha sido completada en su parte sur con la zona costera (zona del espigón de Punta Umbría) de la hoja 999 (3-4), escala 1:10.000, perteneciente al Mapa Topográfico de Andalucía, publicada por el mismo organismo.

La zona seleccionada presenta tres elementos territoriales diferenciados: marismas mareales, el núcleo urbano de Punta Umbría y el elemento geomorfológico que protege las áreas marismeñas, la flecha litoral arenosa de Punta Umbría. Como puede observarse en la figura 1, se trata de una costa expuesta al oleaje oceánico y con un rango medio de mareas (2,15 m, según Borrego y Pendón, 1989) que la cataloga como una costa mesomareal. El proceso de generación del MDE se ha desarrollado exclusivamente sobre las áreas marismeñas.

Caracterización geomorfológica

Dado que el objetivo de este trabajo es crear un MDE que represente adecuadamente las características topográficas del área de estudio, en una primera fase es necesario definir sus elementos y características geomorfológicas más relevantes. Estas características pueden sintetizarse en una serie de extensas áreas planas levemente inclinadas, situadas a distintas alturas, y estructuradas por una red de drenaje. Alrededor de esta red se disponen, en algunos casos, unos elementos lineales, a modo de bordes realzados, cuya altimetría es ligeramente superior: los *levees*. Estos son de enorme interés ya que, cuando están presentes, impiden que gran parte del agua transportada por los canales de marea sea vertida directamente en las llanuras mareales y marismas vegetadas, de forma que es tan solo en la parte final de éstos donde se inicia el proceso de inundación de aquéllas. En la zona de marismas se encuentran intercalados otros elementos geomorfológicos, como son crestas de playa y formaciones arenosas supramareales, así como antrópicos, caso de la carretera del espigón de Punta Umbría, que es necesario integrar en el modelo por su previsible incidencia en el proceso de inundación.

La caracterización geomorfológica de estos elementos se ha basado principalmente en los resultados de la interpretación de las fotografías color infrarrojas (escala 1:18.000) y en visitas a la zona de trabajo. Como resultado del proceso de fotointerpretación, se han identificado los siguientes elementos y unidades (Fig. 2): superficies y elementos intermareales sin vegetación (deltas de marea, llanuras mareales arenosas y limosas, a veces colonizadas por especies pioneras -

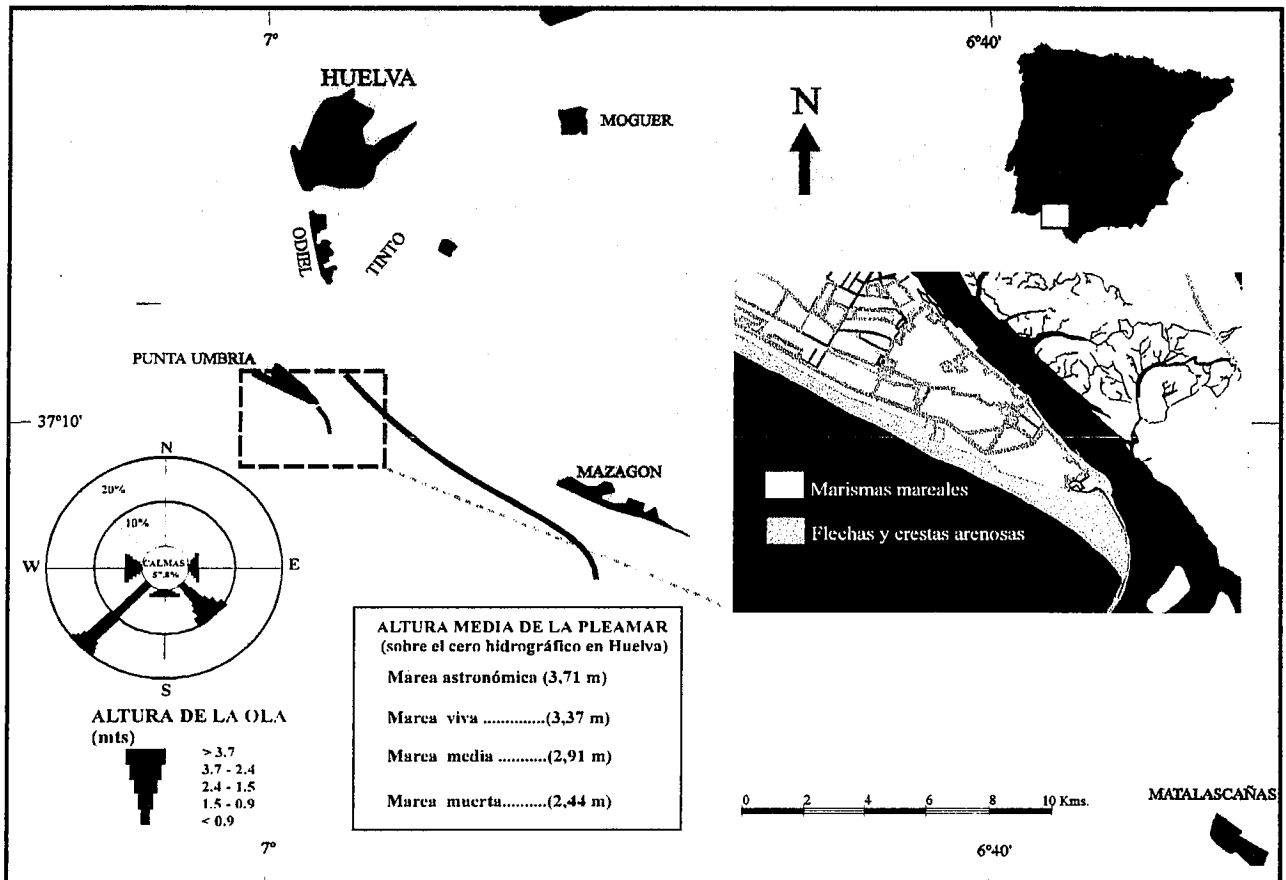


Figura 1.- Localización y parámetros hidrodinámicos básicos del área de estudio. El área incluida en el rectángulo corresponde a la zona de estudio.

seagrass), marismas baja, media y alta con agrupaciones vegetales específicas (*marshes* en la terminología inglesa), formaciones arenosas supramareales (crestas de playas, *spits*) limitadas por playas en las situaciones más expuestas, canales principales y secundarios de marea y *levees*.

Como puede apreciarse en la figura 2, este sector de las Marismas del Odiel, denominado localmente como Isla de Saltés y expuesto en su parte meridional a la influencia directa del mar, constituye un magnífico ejemplo del proceso de colonización vegetal de un sustrato limo-arenoso que ha individualizado diferentes niveles de marismas escalonadas altimétricamente de sur a norte (Rubio, 1985):

-Llanuras mareales arenosas (o limosas en el borde de los canales) no colonizadas por la vegetación, y formaciones arenosas asociadas a los deltas de marea del Canal de Punta Umbría. Algunos sectores de estas unidades están colonizados por especies pioneras (*Zoostera noltii* y *Euteromorpha intestinalis*).

-Nivel de marisma baja inferior, colonizado mayoritariamente por rodales de *Spartina marítima* e individuos aislados de *Sarcocornia perennis*.

-Nivel de marisma baja superior, ocupada de forma más continua por *Spartina marítima* y *Sarcocornia perennis* al ascender en altitud en la misma unidad, con

una mejor estructuración de la red de drenaje.

-Nivel de marisma media, con presencia de las especies anteriores junto a *Halimione portulacoides*, *Salicornia ramosissima* y *Spartina densiflora* en bordes de caños (*levees*).

-Nivel de marisma alta, representada por Quenopodiáceas y leñosas: *Spartina densiflora*, *Arthrocnemum macrostachyum*, etc...

Caracterización morfométrica

La caracterización planimétrica y altimétrica de cada tipo de unidad se ha realizado por medio de fuentes de información directas e indirectas. Entre las primeras se encuentra la cartografía topográfica y el trabajo topográfico de campo. Por otra parte, la tipología de la vegetación ha sido utilizada como una fuente de información indirecta.

Caracterización planimétrica

Desde un punto de vista *planimétrico*, la cartografía topográfica 1:5.000 (Mapa Topográfico Litoral de Andalucía, ICA) es el documento fundamental y ha servido principalmente para dotar de una base consistente (sistema de proyección y coordenadas UTM) a todo el conjunto de unidades. Además, ha sido utilizada para conocer la situación exacta de ciertos elemen-

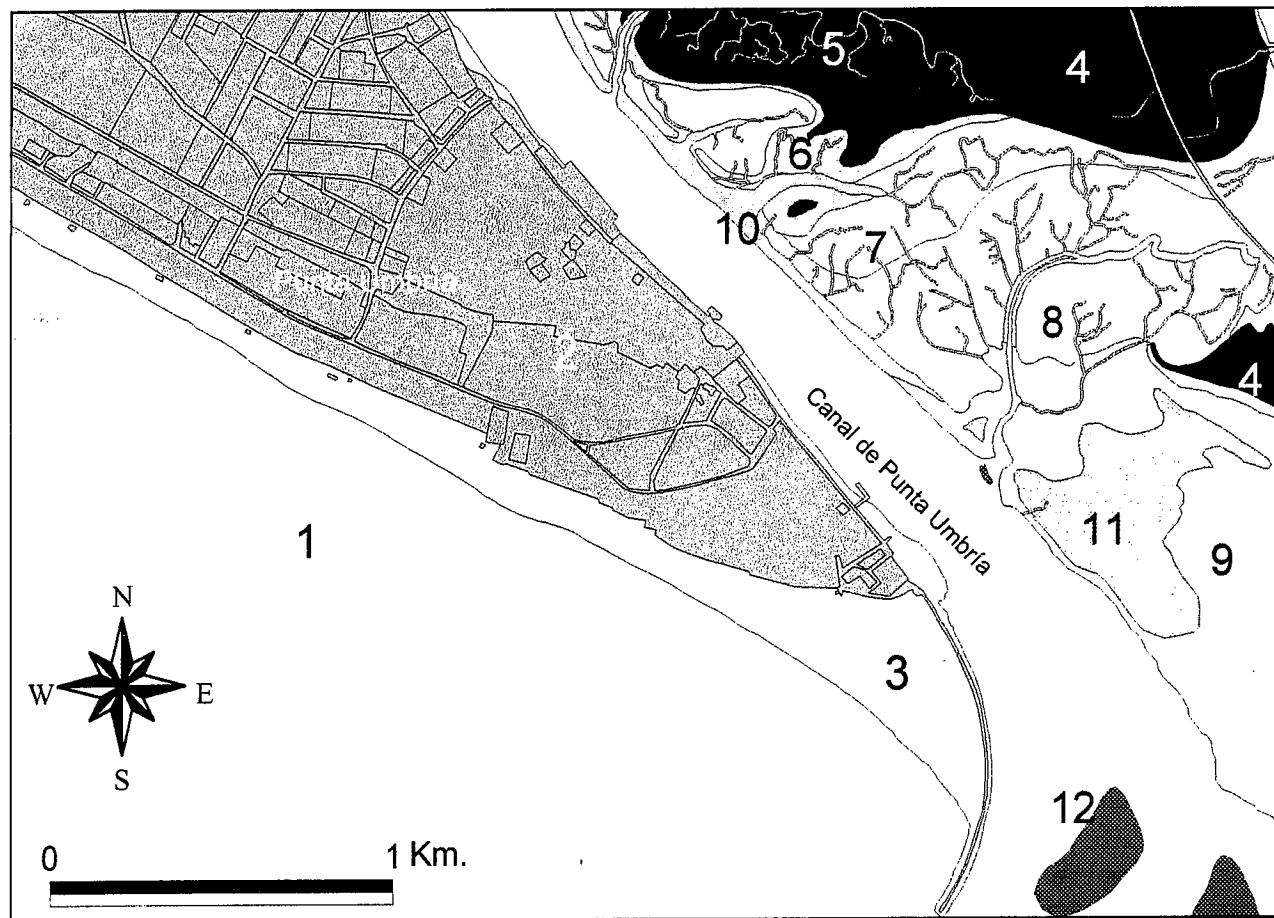


Figura 2.- Elementos y unidades de la zona de estudio, caracterizados a partir de la fotointerpretación. 1: aguas litorales, 2: espacio urbano de Punta Umbría, 3: flecha litoral de Punta Umbría, 4: crestas de playa y formaciones arenosas supramareales, 5: marisma alta, 6: marisma media, 7: marisma baja superior, 8: marisma baja inferior, 9: llanura mareal arenosa, 10: llanura mareal limosa (bordes de caños), 11: llanura mareal con vegetación pionera y 12: deltas de marea arenosos.

tos que sirven para estructurar el resto:

-La red de drenaje es extraída directamente de la cartografía topográfica, ya que presenta un nivel de detalle aceptable para esta aplicación metodológica, aunque podría ser ampliada a través de una fotointerpretación más detallada. Por ello, la representación cartográfica de cualquier red de drenaje es tratada aquí de forma homogénea (como líneas con igual código), independiente de su entidad morfológica.

-De la cartografía topográfica han sido elegidas aquellas vías de comunicación (infraestructuras lineales) que, por su situación, pueden ayudar a la mejora del modelo, en el sentido de que sean utilizadas como líneas que estructuren esa zona en el proceso de triangulación. Adicionalmente, su influencia es importante de cara a una evaluación de los riesgos de inundación.

-La línea de costa que refleja la cartografía topográfica es uno de los elementos que más difiere de los resultados de la fotointerpretación debido a una serie de causas, entre las que se encuentra tanto su gran dinamismo y la variación altimétrica debido a la dinámica mareal, como el criterio utilizado para su definición en la cartografía básica o topográfica. Con todo,

se ha introducido como isólinea de cero metros (cero topográfico) al aportar información altimétrica.

Caracterización altimétrica

Desde el punto de vista *altimétrico*, una cuestión previa es establecer la relación existente entre el cero topográfico y el cero hidrográfico. El *cero topográfico* es el nivel medio de la superficie del mar, que viene definida por el geoido, y se calcula en cada zona costera a partir de observaciones tomadas a intervalos regulares de tiempo durante un largo número de años (Van de Plassche, 1986). En la práctica es el *nivel cero* de referencia para la cartografía topográfica y en España este *nivel cero* de referencia es el obtenido en el Puerto de Alicante. Sin embargo, este nivel medio, considerado como *datum* para la altimetría en la cartografía oficial española, es un *cero técnico* (cero topográfico), sin ninguna implicación medioambiental o ecológica en otro sector costero que no sea el entorno del Puerto de Alicante. En el resto de las costas españolas y andaluzas, el nivel medio del mar puede oscilar respecto al de Alicante en función, entre otros factores, del régimen mareal. Dado que este régimen presenta casi siempre

UNIDADES	RANGOS ALTIMÉTRICOS	NIVELES CRÍTICOS DE MAREA
Planicies Intermareales no vegetadas	0 - 60 cms	Límite Superior: Marea Alta Muerta Media (MAMM).
Marisma Baja Inferior	60 - 80 cms	Límite Superior: Marea Alta Media (MAM).
Marisma Baja Superior	80 - 120 cms	
Marisma Media	120 - 150 cms	Límite Superior: Marea Alta Viva Media (MAVM).
Marisma Alta	150 - 200 cms	Límite Superior: Marea Alta Astronómica (MAA).

Tabla I.- Unidades, rangos altimétricos y niveles críticos de marea para las áreas marismeñas. Elaboración propia a partir de los datos tomados de Rubio (1985). Los rangos altimétricos expresan altitudes sobre el 0 topográfico.

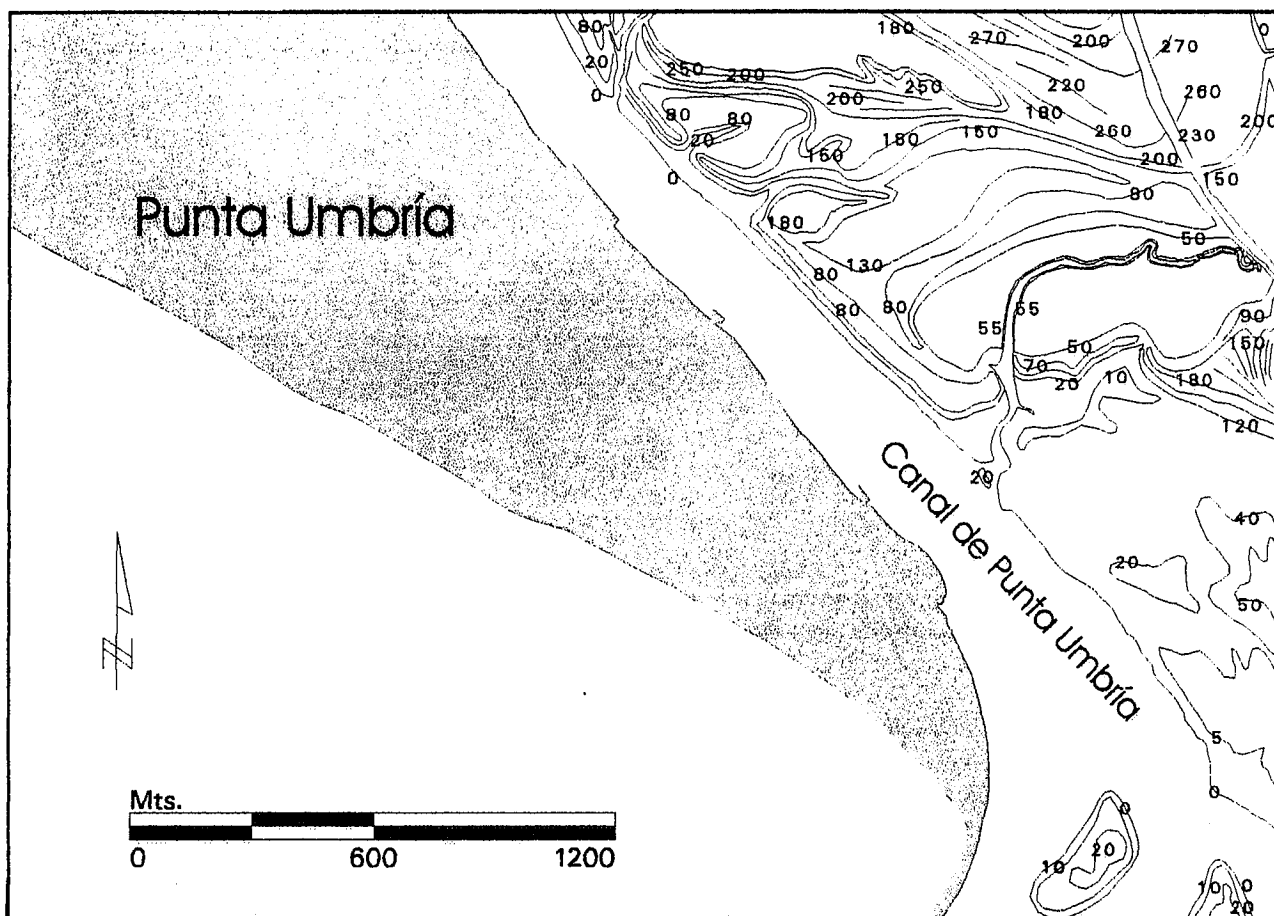


Figura 3.- Curvas de nivel (en cms. sobre el cero topográfico) extraídas utilizando la vegetación como indicador indirecto de la altimetría. El área correspondiente a la flecha de Punta Umbría (en gris), debido a sus muy diferentes características topográficas, no es incluida en el proceso de generación del MDE.

unas componentes locales específicas, es necesario conocer sus características en la zona de estudio y su relación con el cero topográfico. En 1974 fue enlazada la red geodésica nacional con el mareógrafo del Puerto de Huelva y se comprobó que la diferencia respecto al cero hidrográfico, es decir, sobre el valor inferior del

rango mareal (nivel de referencia para la altura de las mareas), era de +183,7 cm. Esto indica que, en nuestra área piloto, el cero hidrográfico está 183,7 cm. más bajo que el cero topográfico, por lo que para hacer compatibles las fuentes de información basadas en el cero topográfico (cartografía) y las mediciones realiza-

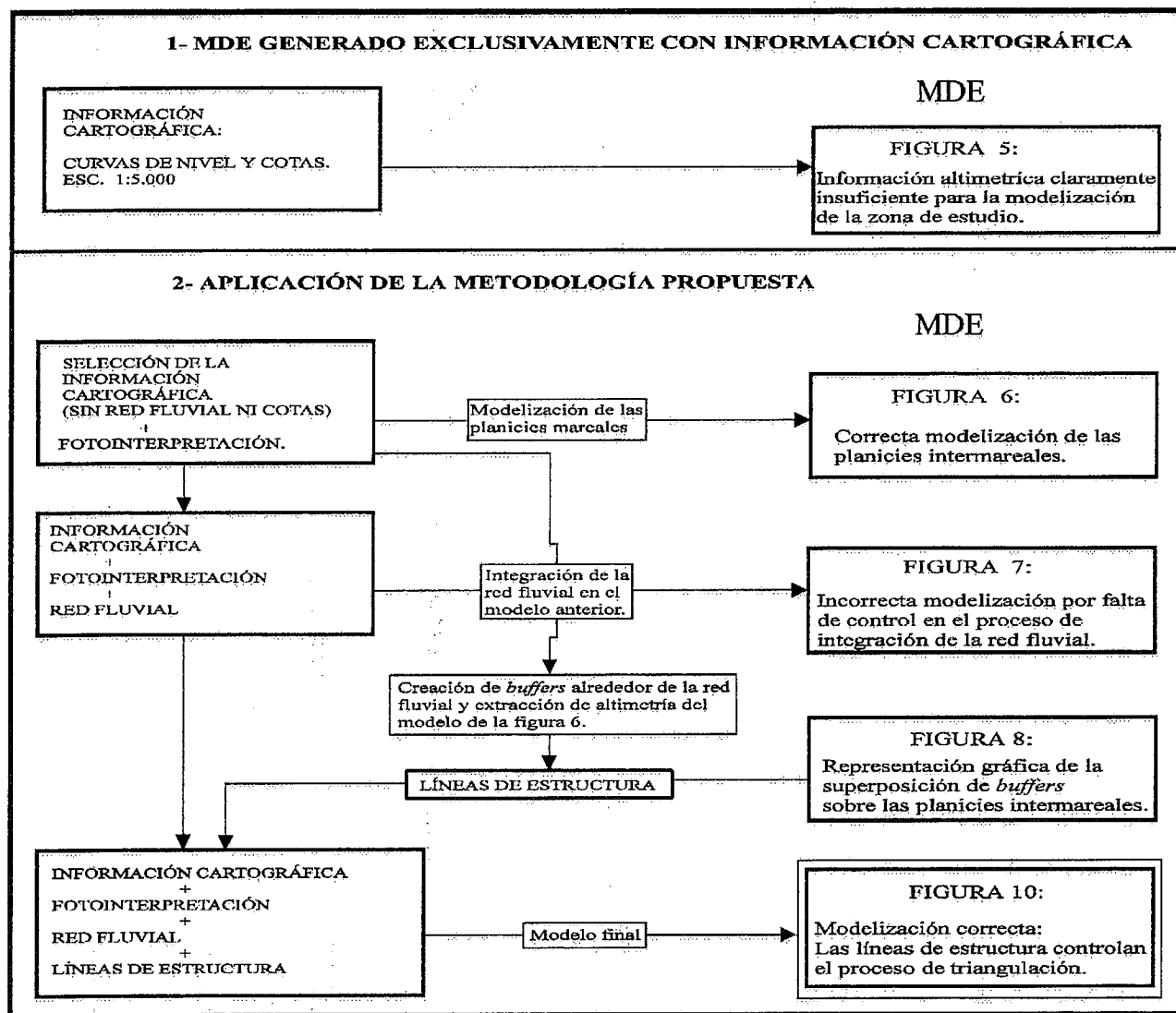


Figura 4.- Proceso metodológico seguido para la construcción del MDE en la zona piloto. El punto 1 indica como es generado un MDE a partir exclusivamente de la información cartográfica y el punto 2 expresa como ese MDE puede ser mejorado gracias a la aplicación de una más compleja metodología sobre nuevas fuentes de información. Las líneas de flujo unen los distintos tipos de fuentes de información (izquierda) con los MDE resultantes (derecha). En la parte central pueden ser observados los principales pasos de la metodología propuesta.

das a partir del cero hidrográfico (trabajo de campo, cartas náuticas, rangos altimétricos de la vegetación, etc), se han tenido que trasladar estos últimos al nivel de referencia de la cartografía básica.

La altimetría de las diferentes unidades marismas se ha llevado a cabo utilizando distintas fuentes de información, en función de las características de estas unidades:

a) En las planicies intermareales, cada tipo de vegetación ocupa lugares específicos en relación con el nivel de inundación que soporta la zona en que se encuentra (hidroperiodo), de forma que la vegetación puede ser utilizada como un indicador indirecto de la altitud de esa zona, lo que permite delimitar las diferentes planicies intermareales con formaciones vegetales específicas como áreas de altitud homogénea (dentro de un rango variable) y diferente del resto (Fig. 3). Principalmente es el trabajo topográfico de campo (per-

files topográficos) el que ha permitido la asignación de estos rangos en el área de estudio (Rubio, 1985) en función del tipo de vegetación (Tabla I). Las cotas altimétricas procedentes de la cartografía topográfica han permitido completar esta información.

b) A la línea de costa interpretada a partir de la fotografía aérea (tomada en marea baja), así como a la superficie inundada en los canales de marea y a la red de drenaje, se les asignó una altimetría de 0 m.

c) A los *levees* se les asignó altimetría por medio de trabajo de campo (perfiles topográficos transversales a la red de drenaje) y de la información de las cotas altimétricas que, sobre ellos, se hallaron en la cartografía topográfica.

d) A las flechas litorales arenosas y otras formaciones arenosas supramareales se les proporcionó una altimetría basada en las labores de fotointerpretación, con la ayuda de las escasas curvas de nivel y cotas que

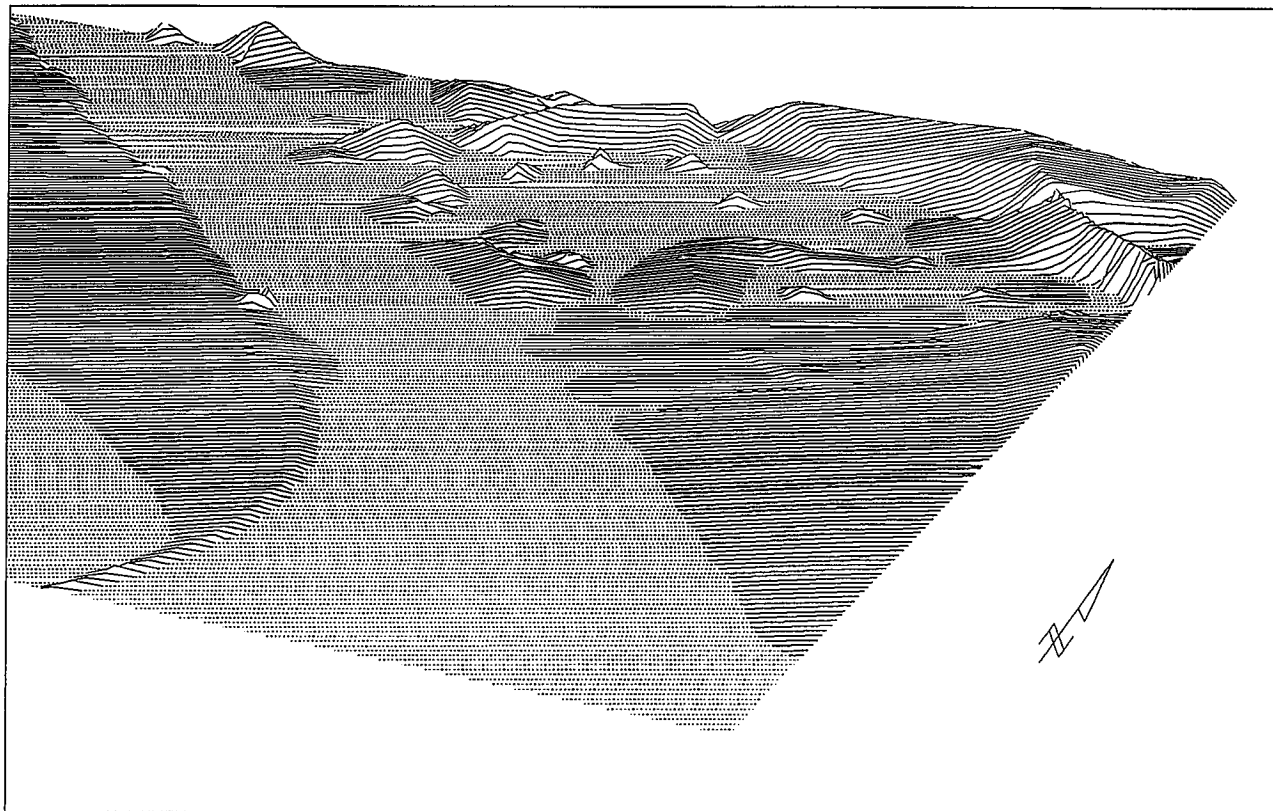


Figura 5.- Visión tridimensional del MDE generado exclusivamente con información altimétrica procedente de la cartografía 1:5.000. Incorrecta modelización, con generación de zonas deprimidas en el interior del área de marismas.

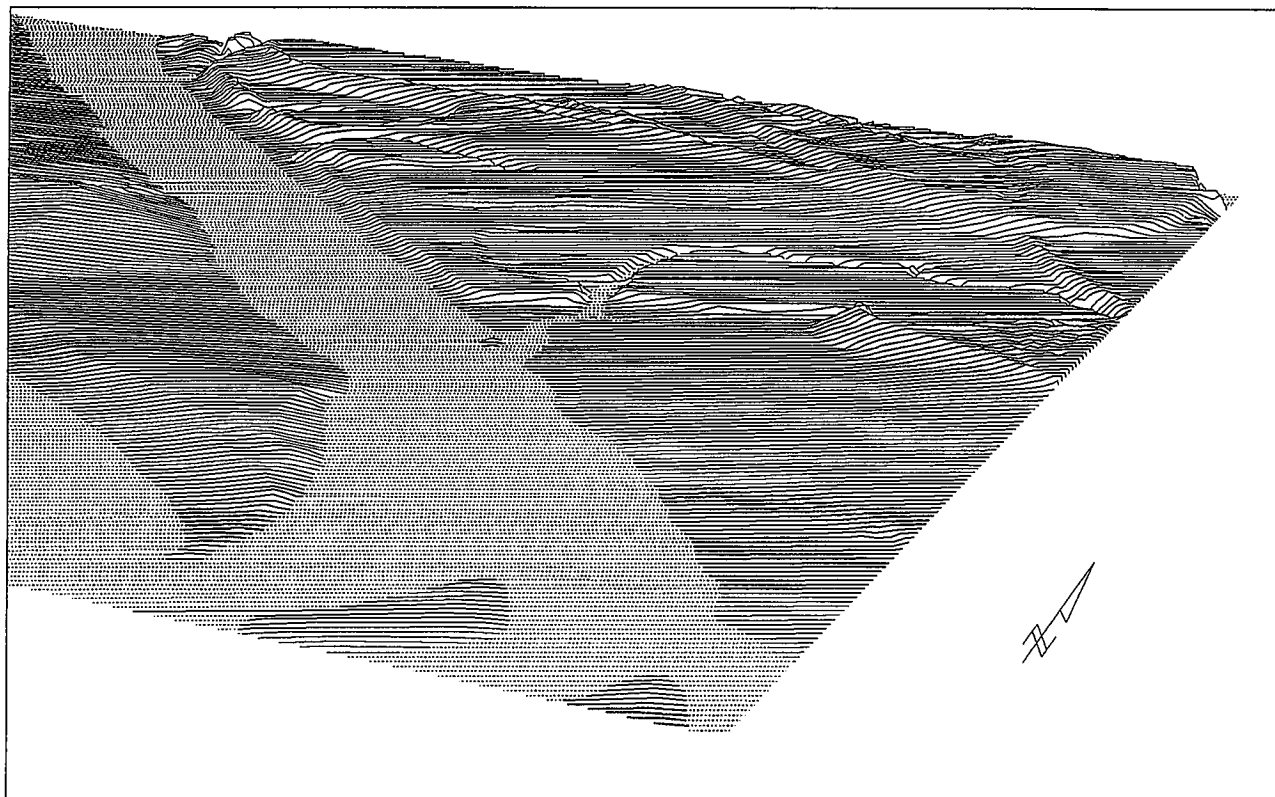


Figura 6.- Visión tridimensional del MDE generado con una selección de la información altimétrica de la cartografía y la procedente de la definición de planicies intermareales a través de fotointerpretación y apoyo topográfico de campo. Correcta modelización de planicies intermareales.

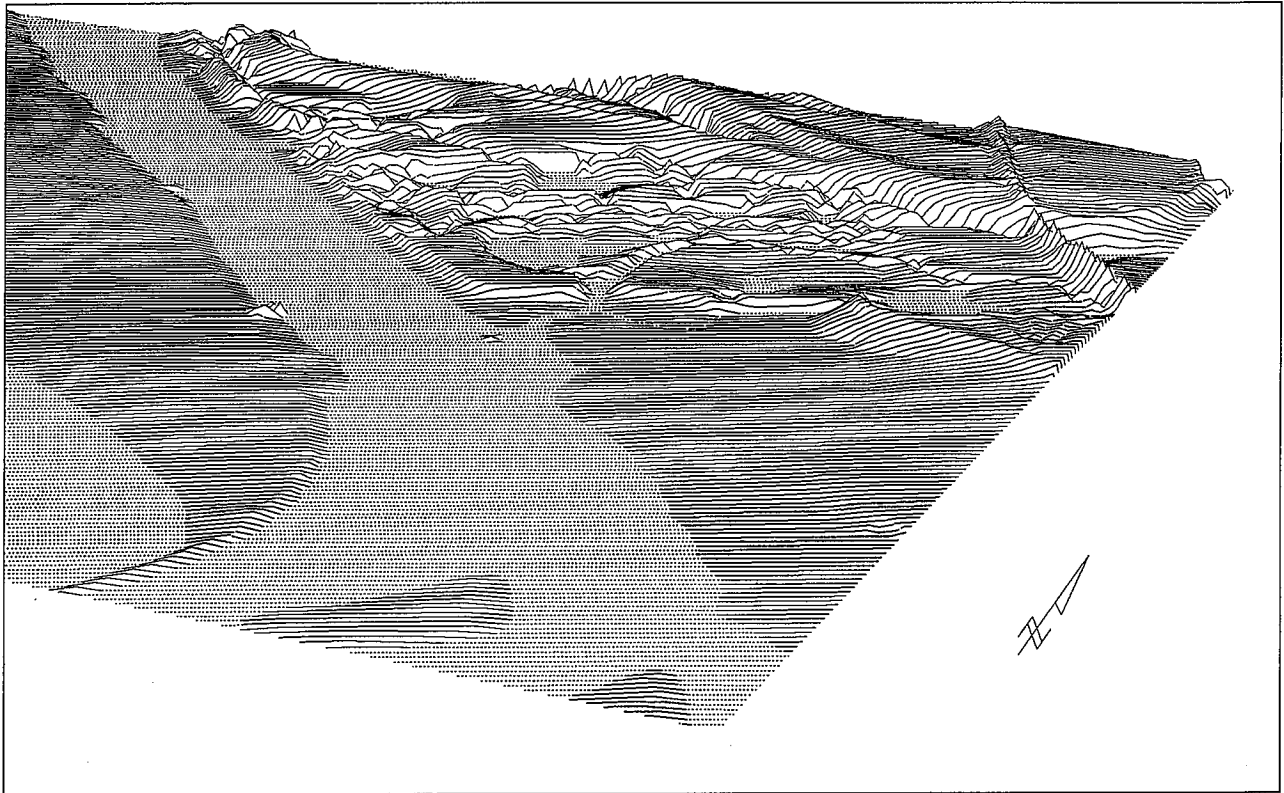


Figura 7.- Visión tridimensional del MDE generado tras integrar la red fluvial e infraestructuras en el MDE utilizado en la Figura 6. Incorrecta modelización en las planicies intermareales que denota falta de control sobre el proceso de interpolación.

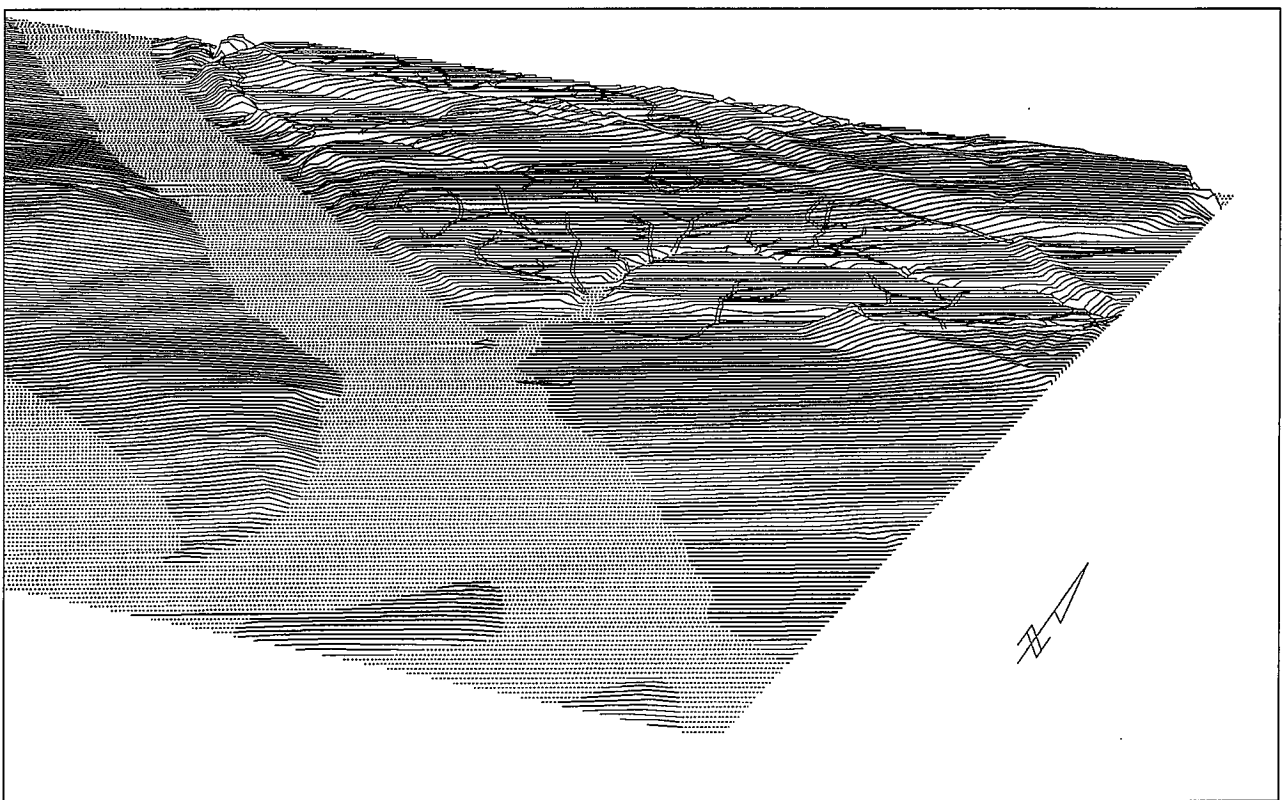


Figura 8.- Visión tridimensional del MDE representado en la Figura 6 en el que se han superpuesto los buffers correspondientes a la red de drenaje, para generar líneas de estructura.

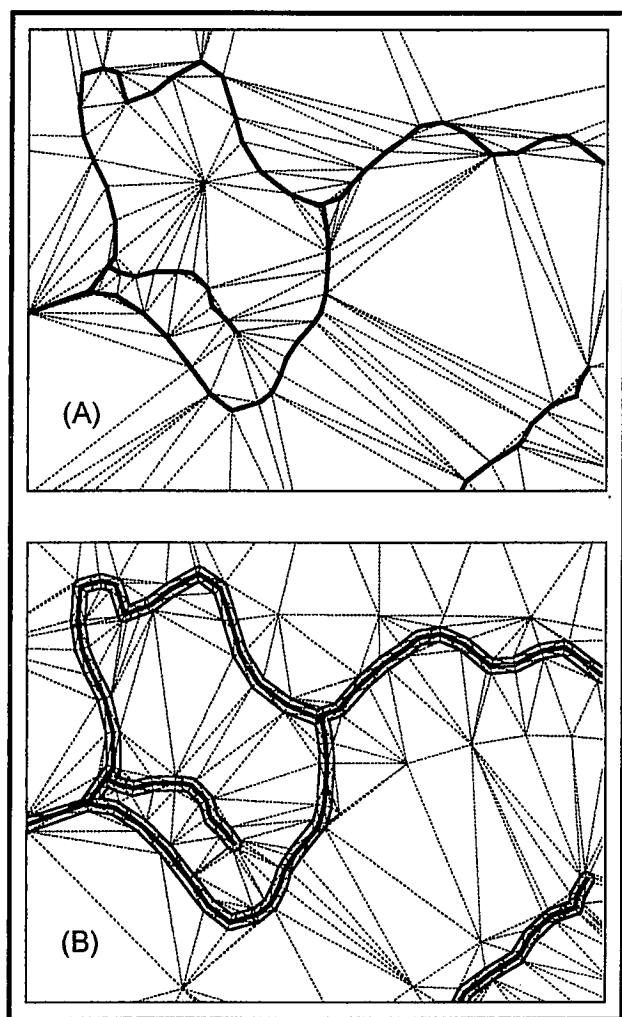


Figura 9.- Control en el proceso de triangulación: (A) Generación de triángulos entre la propia red de drenaje, creando zonas deprimidas. (B) Incorporación de buffers como líneas de estructura, con valores altimétricos tomados de las planicies intermareales.

aparecen en la cartografía topográfica.

e) Las vías de comunicación no llevan explícitamente asociados unos valores altimétricos como tales vías pero la cartografía topográfica suele presentar cotas altimétricas sobre ellas. Con esta información es posible calcular la altura aproximada de tales vías, transformando esa información puntual y discontinua en otra lineal y continua mediante su tratamiento en el SIG como *línea de estructura*, de modo que, en cada punto, la vía tendrá una altimetría distinta y garantizará el proceso de triangulación en ese sector.

Integración de la información morfométrica y generación del Modelo digital de elevaciones (MDE)

La integración de la información planimétrica y altimétrica para la generación del MDE se ha llevado a cabo en tres fases, siguiendo la metodología ya expuesta. La figura 4 muestra, de forma esquemática, cuál es el proceso metodológico seguido para la construcción del MDE en la zona piloto. Con este proceso escalonado se pretende superar los problemas iniciales deriva-

dos de la aplicación directa de algoritmos de triangulación exclusivamente sobre los datos altimétricos presentes en la cartografía oficial, por medio de una secuencia de operaciones que permitan un mejor aprovechamiento de estas fuentes, en combinación con nuevos tipos de información complementaria. La Figura 5 muestra el resultado de generar un MDE exclusivamente con la información altimétrica existente en la cartografía básica a escala 1:5.000. En este caso, como en todos los siguientes, se ha utilizado para la generación del MDE un módulo (*Structured Elevation Model, SEM*) que utiliza una estructura TIN (*Triangular Irregular Network*) y que está perfectamente integrado en un software SIG (Arc-Info PC), el cual gestiona todo el conjunto de información y, finalmente, genera los resultados gráficos (vistas tridimensionales). El resultado gráfico que recoge la figura 5 es evidente y sirve de ejemplo para ilustrar la insuficiencia de la información cartográfica y sus limitaciones para generar un MDE en áreas marismas. El proceso metodológico que sigue a continuación intenta subsanar estas deficiencias a través de un procedimiento escalonado que empieza por modelar las unidades más extensas (planicies intermareales) e incorpora progresivamente los elementos menores, como la red de drenaje, utilizando *líneas de estructura* que guían la triangulación:

1) En la primera fase se genera un MDE de las planicies intermareales (Fig. 6). La información aportada por la cartografía (línea de costa y canal principal de marea) se une a la extraída de la fotointerpretación de la fotografía aérea infrarroja y a la información topográfica complementaria. Los rangos altimétricos para cada unidad se han convertido en isólinas adaptadas a la red de drenaje y se han introducido los *levees* asociados (figura 3) creando un modelo en el que puede observarse la disposición de las superficies intermareales, algunos microescarpes que las separan y la ausencia de la red de drenaje, aún no incluida en el modelo.

2) En una segunda fase se ha integrado en el modelo anterior la red de drenaje y las vías de comunicación, con lo que se ha generado un tercer MDE (Fig. 7). Puede observarse la aparición de grandes zonas deprimidas interiores y la conversión de un gran número de planicies intermareales en áreas inclinadas, principalmente hacia la red de drenaje. Esto es debido al proceso de interpolación llevado a cabo entre la nueva información introducida (la red de drenaje) y la anterior (las isólinas correspondientes a las planicies intermareales), interpolación que rompe la estructura topográfica conocida por el análisis geomorfológico y que denota una falta de control sobre el proceso de triangulación.

3) En la tercera y última fase este proceso de triangulación va a ser controlado mediante la integración de nuevas *líneas de estructura*. Éstas nos van a permitir la división del área en zonas entre las cuales no es posible triangular, forzando al algoritmo a utilizarlas siempre como límites de triángulos. Establecer la posición de las líneas que delimitan estas zonas es una fase

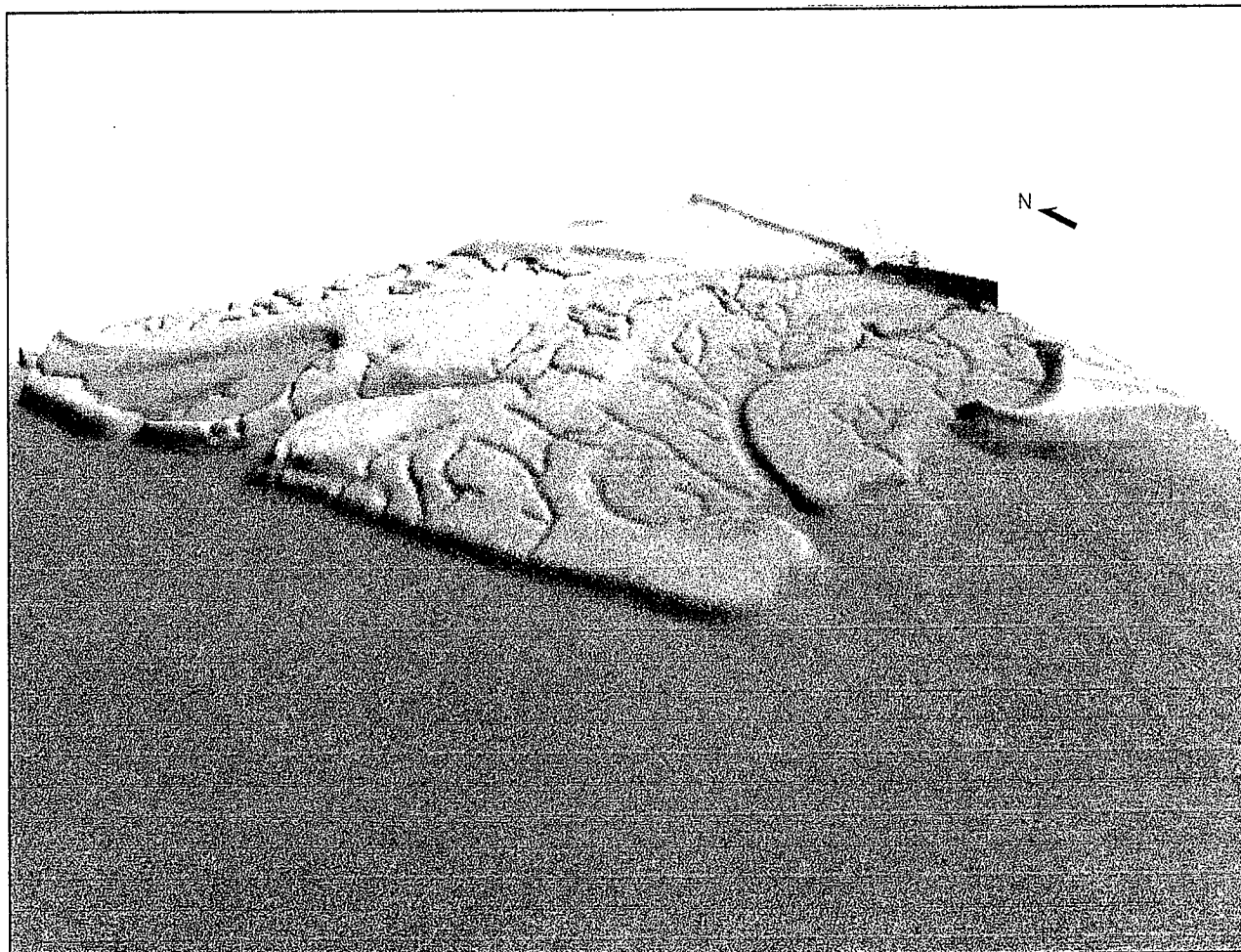
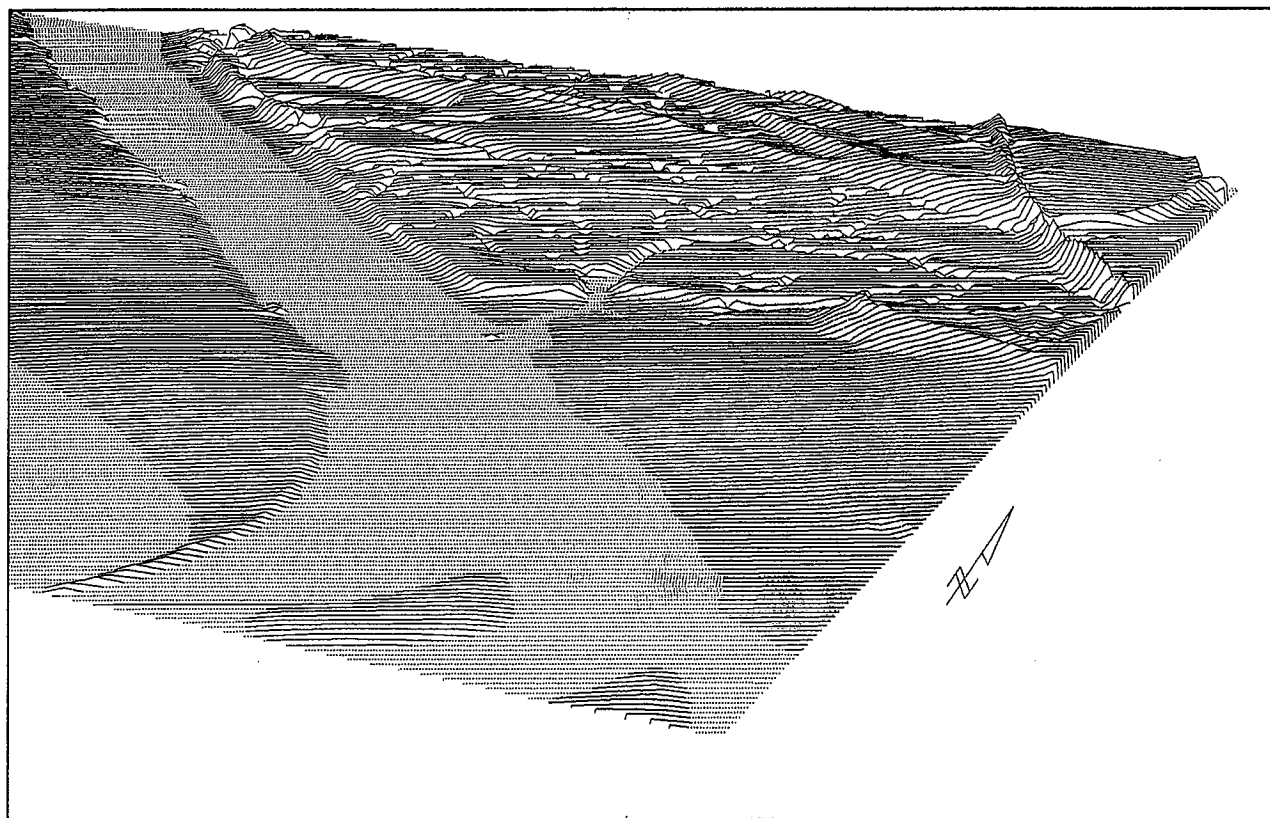


Figura 10.- Vistas tridimensionales del MDE definitivo.

crucial, ya que se disponen en torno a los elementos cuya introducción alteraba el modelo inicial (red de drenaje, vías de comunicación, *levees*), de forma que el proceso de triangulación tiene en cuenta estos límites y ya no se efectúa siempre entre puntos cercanos no colineales. Desde el punto de vista planimétrico, estas *líneas estructurales* han sido generadas mediante un procedimiento informático que automatiza el proceso de creación de líneas paralelas y equidistantes a una línea dada (*buffers*). La asignación de altimetría a estas *líneas estructurales* es esencial para el resultado final, ya que éstas deben garantizar una correcta triangulación entre la zona de *buffer* y las líneas que definen la red fluvial, pero no deben alterar la altimetría de las planicies intermareales recogida de forma aceptable en el MDE de la figura 6. La solución adoptada fue proporcionada por la utilización de un comando del módulo SEM (*Structural elevation model*) que permite superponer líneas a un MDE y generar una *línea de estructura* que toma la altimetría de aquél (Fig. 8). De esta forma, estas líneas no aportan nueva información altimétrica sino que tan solo impiden la triangulación entre ciertas áreas (Fig. 9). Todo ello permite generar un modelo final (Fig. 10) en el que las características morfológicas y topográficas de este espacio marismero (observadas en el trabajo de campo) se ven adecuadamente reflejadas: aparecen canales principales y secundarios de marea, márgenes alrededor de cada canal, *levees* que rodean algunos de los canales, y grandes áreas planas o levemente inclinadas a diferentes alturas (planicies intermareales).

Consideraciones finales y conclusiones

La cartografía disponible y fácilmente accesible en las áreas costeras es proporcionada por series de cartografía básica, cuya información altimétrica está bastante reglada por la tradición y acuerdos técnicos (isolíneas, cuya equidistancia depende de la escala, y puntos acotados). Dicha información se revela como claramente insuficiente para una adecuada caracterización altimétrica de estos espacios debido a sus características singulares siendo, sin embargo, su correcta caracterización altimétrica considerada de sumo interés para su gestión y ordenación, y es demandada por muchas aplicaciones y especialidades temáticas (ecología, evaluación de riesgos de inundación...). Esta afirmación es extensible incluso a las series cartográficas de mayor detalle.

Las técnicas actuales de adquisición de altimetría para la generación de cartografía (restitución fotogramétrica, taquimetría de precisión, *GPS*, etc.) proporcionan un volumen de datos altimétricos muy superior, el cual queda finalmente simplificado en el proceso de edición y publicación. Sería deseable que ese volumen de información fuese igualmente accesible, dado que el soporte digital, cada día más utilizado por los mismos organismos productores de cartografía básica, posibilita su fácil distribución, si bien es cierto

que en determinadas áreas (planicies vegetadas) el levantamiento de datos altimétricos es complejo. La distribución de MDE como un subproducto del proceso de elaboración cartográfica, en los organismos con competencia tanto a nivel nacional como regional, es la vía más acertada y ya iniciada por algunos.

Ante la imposibilidad de acceder a esta información detallada, en este artículo se ha presentado una metodología para la generación de MDE a partir de isolíneas y cotas, junto a otros datos complementarios de carácter cualitativo pero de indudable valor, como es la caracterización geomorfológica, ya que los MDE son totalmente necesarios para multitud de aplicaciones en los espacios costeros (riesgos de inundación, balances sedimentarios, evaluación del potencial ascenso del nivel del mar, etc...). El resultado es una caracterización altimétrica, centrada en nuestro caso en espacios marismeros, muy superior a la proporcionada por la generación de MDE a partir exclusivamente de los datos aportados por la cartografía publicada. Esta mejora se basa en tres elementos claves:

- Un análisis previo de las características geomorfológicas del espacio a modelar se considera como un elemento clave para la correcta generación de MDE en espacios marismeros. El conocimiento de estas características permite evaluar cualitativamente la adecuación del MDE generado a la realidad y la detección de errores. A su vez, solo un análisis en esta línea permite la identificación de los elementos morfológicos que posteriormente se utilizarán como *líneas de estructura*.

- La utilización de la vegetación marismera como un indicador altimétrico indirecto, en las áreas donde es más difícil o muy costoso obtener información altimétrica directa (planicies intermareales vegetadas).

- La utilización de *líneas de estructura*, identificadas en el análisis geomorfológico, como elementos que permiten controlar y optimizar los algoritmos de triangulación en el proceso de generación de los MDE.

Para finalizar, el enfoque metodológico de este artículo revela el interés en desarrollar cartografía temática (geomorfología, vegetación, etc...) en los espacios marismeros, ya que en la medida que esta información complementaria sea más detallada también lo serán los MDE que la utilicen en el proceso de generación. Esta conclusión final también es aplicable al MDE generado en la zona piloto para este artículo, ya que al tratarse de una aplicación metodológica, los resultados se verían beneficiados por una cartografía de vegetación más detallada, así como por una interpretación geomorfológica más precisa.

Bibliografía

- Bijlsma, L., O'Callaghan, J., Hillen, R., Misdorp, R., Mieremet, B., Ries, K., Spradley, J.R. y Titus, J. (Eds.) (1992): *Global climate change and the rising challenge of the sea*. Report of Coastal Zone Management Subgroup (CZMS), Ministry of Transport, Public Works and Water Management, The Hague, 120 p.

- Boorman L.A., Goss-Custard, J.D., McGrotray, S. (Eds.) (1989): *Climatic change, rising sea level and the British coast*. Institute of Terrestrial Ecology (ITE), Natural Environment Research Council, London, 24 p.
- Borrego, J. y Pendón, J.G. (1989): Caracterización del ciclo mareal en la desembocadura del río Piedras (Huelva). *Actas del XII Congreso Español de sedimentología*, 1: 97-100, Bilbao.
- Brändli, M. (1991): A triangulation based method for geomorphological surface interpolation from contour lines. En: *EGIS'92 Proceedings* (Harts, J., Ottens, H., Scholten, H., Eds.), vol. 1, 691-670.
- Carter, R.W.G. (1989): *Coastal environments: an introduction to physical, ecological and cultural systems of systems of coastlines*. Academic Press, London, 300 p.
- ESRI Germany (Environmental System Research Institute) (1991): *PC SEM. PC Arc-Info terrain modelling and analysis*. ESRI, 70 p.
- Felcísimo, A.M. (1994): *Modelos digitales del terreno*. Editorial Pentalfa, Oviedo, 220 p.
- McCullagh, M.J. (1988): Terrain and surface modelling systems: Theory and practice. *Photogrammetric Record*, 12 (72): 747-779.
- McCullagh, M.J. and Ross, C. (1980): Delaunay triangulation of a random data set for isarithmic mapping. *Cartographic Journal*, 7, (2): 93-99.
- Rubio, J.C. (1985): *Ecología de las marismas del Odiel*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla (inédita), 3 vol.
- Van de Plassche, O. (1986): Introduction. En: *Sea level research. A manual for the collection and evaluation data*. Contribución al proyecto 61-200 de International Geological Correlation Progue (UNESCO-IUGS), 1-20.
- Weibel, R. y Heller, M. (1991): Digital terrain modelling. En: *Geographical Information Systems: principles and applications*. Vol I: Principles (Maguire, D. J., Goodchild, M. F. and Rhinds, D. W., Eds.), Longman, London: 269-297.

*Manuscrito recibido el 10 de Junio de 1996
Aceptado el manuscrito revisado el 20 de Mayo de 1997*