



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE BARCELONA**

PROGRAMA DE DOCTORADO DE INGENIERÍA DEL TERRENO

**VALIDACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL
TERRENO DE PRECISIÓN A PARTIR DE DATOS LÁSER
ESCÁNER AEROTRANSPORTADO; APLICACIÓN A LA
MARISMA DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA**

AUTOR

ENRIC IBÁÑEZ MARTÍNEZ

DIRECTOR

JOSEP A. GILI RIPOLL

BARCELONA, ABRIL DE 2008

CAPÍTULO: 6

ANÁLISIS CONJUNTO DE RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN Y PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE FILTRADO PARA LA GENERACIÓN DE MDT's EN ÁREAS EXTENSAS Y LLANAS

En el capítulo anterior se ha analizado detalladamente la calidad del MDT del Parque Nacional de Doñana. Ésta es un área extremadamente llana y extensa cuyos requerimientos altimétricos para el modelado hidráulico están cerca de la precisión del *ALS*.

Este capítulo se divide en dos grandes bloques. En el primero se analiza de manera conjunta toda la información desgranada en el capítulo anterior y se evalúa cuantitativamente y cualitativamente la calidad del MDT. También se incluyen las conclusiones sobre la calidad del modelo y el modo de expresarlo en áreas como la analizada. En el segundo bloque se va un paso más allá y con los resultados de la validación del modelo se presentan algunas estrategias que permiten mejorar los procesos de generación y edición de MDT's en áreas similares a Doñana, áreas extensas y llanas.

6.1. VALORACIÓN FINAL DEL MDT

En el capítulo anterior se ha comprobado el modelo *ALS* de Doñana mediante comprobaciones cuantitativas y cualitativas (genéricas y específicas). En este epígrafe se resume la valoración conjunta de la calidad del Modelo Digital del Terreno.

6.1.1. Resumen de la validación cuantitativa

Los resultados del análisis cuantitativo sobre cada grupo de datos de comparación (epígrafe 5.2) se presentan en la tabla 6.1, donde se indica además el número de puntos útiles, el ambiente característico de los datos y el error obtenido (media, σ , y error al 95% de intervalo de confianza). Finalmente en la última columna se indica si los resultados de la comparación han sido considerados aceptables o no.

Del análisis cuantitativo se podría intentar extraer un único conjunto de estadísticos que valoren cuantitativamente la calidad del MDT para todo el levantamiento usando toda la información disponible. Pero como se expresa en la figura 6.1 la información de puntos singulares y de áreas es distinta, y no es comparable.

Con los puntos singulares, aunque la información es puntual, está bien repartida por todo el ámbito de estudio. En cambio, con las áreas, a pesar de disponer de un número elevado de puntos (más de 17000 en este caso), están concentrados en zonas concretas del Parque (la mayoría en Matasgordas, al Norte-Oeste). Aunque se podría intentar ponderar los distintos valores del error de la tabla 6.1 en función del área representada por cada conjunto de información de referencia, ello carece de sentido estadístico.

Tabla 6.1. Resumen de los estadísticos de los análisis realizados en distintas zonas del P.N. de Doñana (valores en m).

Tipo de información de referencia	Ambiente	Puntos usados / totales	Media	σ	Diferencia Max/Min	$\epsilon_{\sigma,z}$ (95%) ($m \pm 1.96 \cdot \sigma$)	Aceptación
Puntos singulares repartidos por el Parque Nacional (P.N)	marisma – coto	27/32	-0.012	0.079	0.180/-0.135	-0.012 \pm 0.156	SI
a. Área de Matasgordas	marisma – coto	17011/17529	0.069	0.064	0.274/-0.141	0.069 \pm 0.125	SI
b. Área de Lagunas	dunar - coto	76/82	-0.057	0.090	0.200/-0.240	-0.057 \pm 0.176	SI
c. Perfiles dunas	dunar	70/72	-0.095	0.150	0.397/-0.331	-0.095 \pm 0.294	NO
		70/72	-0.125	0.092	0.123/-0.331	-0.125 \pm 0.180	SI(1)

(1). Estos resultados se han obtenido recalculando el MDT en el área con errores (ver epígrafe 5.2.2) y sólo afectan al ambiente dunar.

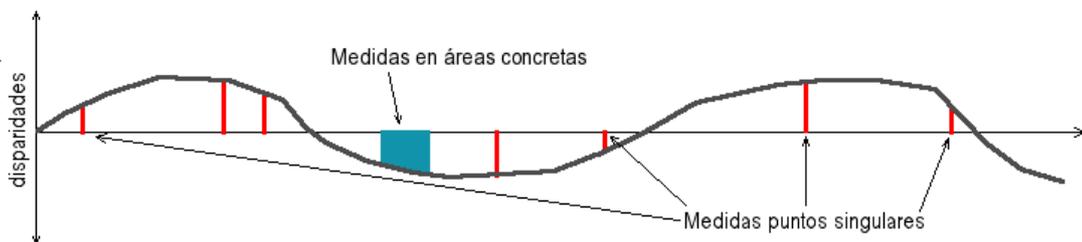


Figura 6.1. Esquema de la distribución espacial del error altimétrico en el ámbito de estudio. Se muestra la distribución de las comprobaciones en puntos singulares (bien repartidas en todo el Parque Nacional) y en áreas concretas (concentradas en determinadas zonas).

En una segunda aproximación algunos autores (Maune [2001] y LindenBerger *et al.* [2003]) proponen clasificar la información de referencia en función de los ambientes presentes en el levantamiento, definidos principalmente por el tipo de vegetación y pendientes. Se recomienda usar un mínimo de 20 puntos de control por ambiente definido (Maune [2001]). Se dispone de suficiente información en la Marisma, aunque afectada por el problema planteado en la figura 6.1. Los valores de error que se obtendrían se encontrarían entre los correspondientes a las dos primeras líneas de la tabla 6.1 (en función de cómo se ponderen). Pero como se expondrá en el siguiente epígrafe ésta es una forma demasiado limitada de valorar cuantitativamente la calidad de un MDT, al menos en áreas extensas y llanas como la analizada; es mejor caracterizar la estructura del error *LiDAR* en función del tamaño del área de modelo considerada.

6.1.2. Estimación de la estructura espacial del error *LiDAR*

Es común la opinión de que los valores de la tabla 6.1, por sí solos no son suficientes para evaluar la calidad del MDT (Huising y Gomes [1998], Maune [2001], Crombaghs *et al.* [2002] y Peng y Shih [2006]). La precisión en un área del modelo depende esencialmente de la pendiente del entorno del punto *ALS*, de la cubierta vegetal, de la rugosidad local y de la densidad de puntos clasificados como terreno. En áreas como la estudiada la dependencia de la pendiente es muy baja. La rugosidad local viene definida por el tipo de terreno y por el diámetro de la huella (aproximadamente 22cm, evaluado con la expresión E.2.5). En este caso, el diámetro sólo tiene efecto en el ambiente dunar (tabla 6.1). Las áreas con vegetación, en general, presentan un mayor error, y si ésta es densa, producen descensos de densidad de puntos clasificados como terreno. Las áreas con densidad baja pueden generar problemas de representatividad del modelo aumentando el error del MDT, como ya se ha mostrado en la validación.

El origen del error en un Modelo Digital de Elevaciones, como se ha expuesto en el capítulo 2, tiene distintas fuentes. Se puede descomponer, en primera instancia, en el error de interpolación y en el error asociado a los datos usados al generar el modelo (Fisher [1998]). El asociado a los datos se ha expuesto con detalle en el

epígrafe 2.3, no es uniforme en toda la extensión del modelo como supondría proponer un valor único. El error tampoco es el mismo en áreas pequeñas o en grandes áreas, dado que las fuentes de error que contribuyen al total se dan a distintas escalas (entendiendo por escalas las distancias típicas o características en las que se reproduce un determinado tipo de error).

Así, los errores que se introducen en el ajuste de las tiras de levantamiento no aparecen si se analiza la zona central de una pasada. En cambio, los debidos al posicionamiento del avión se dan cada 70-100m en la dirección de vuelo (coincide con la velocidad en el caso de aviones y *GPS* de 1Hz), y los de una medida láser se dan en cada punto. Estos dos últimos se combinan mediante la ecuación general del láser (capítulo 2, E.2.4).

Según Crombaghs *et al.* [2002] las fuentes de error del *ALS* se pueden agrupar en cuatro escalas según su incorporación en el Modelo Digital de Elevaciones *ALS* (figura 6.2). La primera es a nivel de bloque de levantamiento y es normalmente kilométrica. La segunda incluye las áreas de solape entre tiras del levantamiento. Su escala es hectométrica (en este caso entre 180 y 330m). La tercera está controlada por la distancia entre medidas *GPS* según la dirección de vuelo que suele estar entre los 70 y 100m. La cuarta y última escala es la que según este modelo de error altimétrico está afectada por menos fuentes de error. Para aplicar la metodología propuesta en Schenk [2001] para disminuir estos errores, se requiere generar un modelo de error altimétrico mediante la ecuación general del láser. Pero no se ha aplicado aquí ya que no se dispone de suficiente información para evaluar cada uno de los parámetros de la ecuación general del láser (los 6 grupos definidos en la E.3.5). Sin embargo se ha adaptado el modelo de error de Crombaghs *et al.* [2002] sobre las varianzas de cada una de las escalas definidas (E.6.1) a los datos de Doñana.

Por lo tanto en el caso estudiado, la información de puntos aislados repartidos globalmente en el P.N. (primera línea tabla 6.1) debe entenderse como un valor global de un error, por encima de las escalas. En este caso sólo hay dos bloques y uno es mucho más pequeño que el otro, con lo que el valor de los puntos aislados será muy cercano al de la primera escala de error ya definida (nivel de bloque). Así con este valor global se comprueba la calidad del MDT a nivel de bloque y la presencia de tendencias generales. En cambio la información en las áreas (Matasgordas, Lagunas y Perfiles; tabla 6.1) se sitúa en las escalas 2ª, 3ª y 4ª. Cubre con una información más densa un área en concreto (sobretudo en Matasgordas) abarcando áreas de solape. Como se ha visto en la tabla 5.6 y en el apartado c) del epígrafe 5.3.2, en los solapes el error es algo más elevado. Esto da una estructura espacial característica que se recogerá con las escalas 2ª y 3ª.

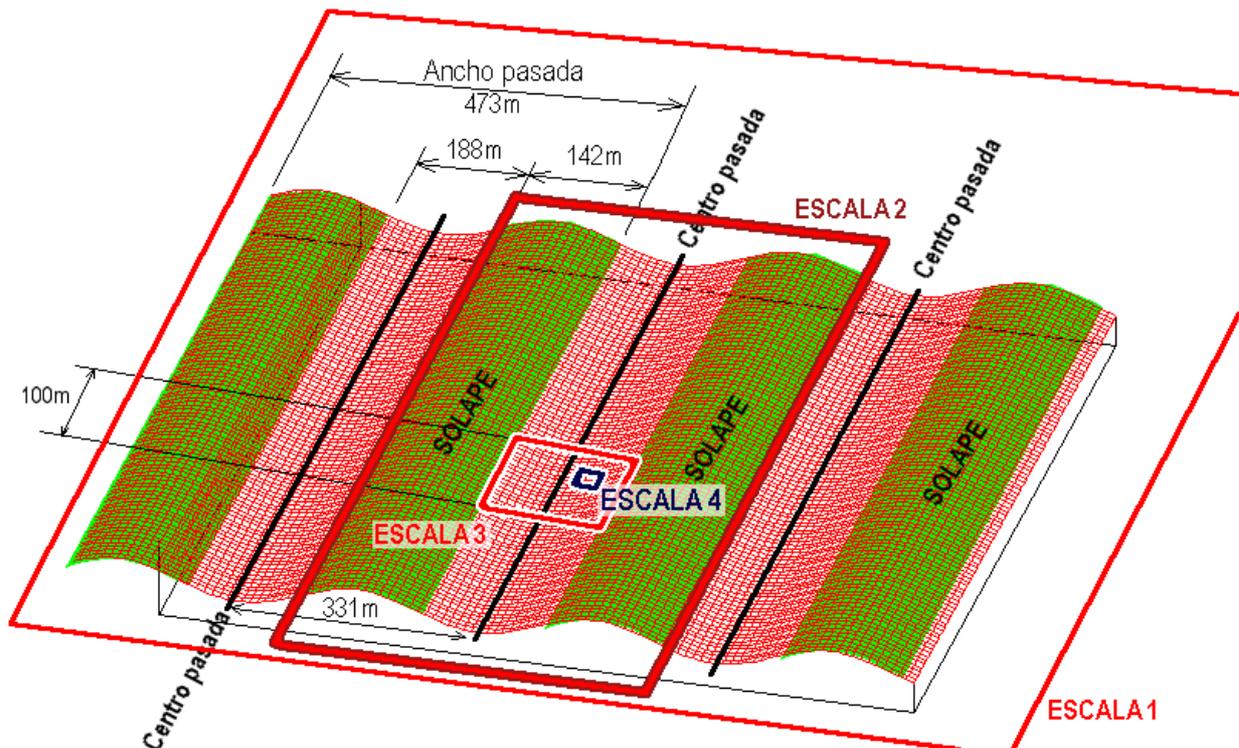


Figura 6.2. Esquema del modelo de error altimétrico con las dimensiones del levantamiento *ALS* de Doñana y las cuatro escalas, definidas en el texto. Valores de la tabla 5.1.

El análisis geoestadístico del epígrafe 5.2.2 (figura 5.16 – pg. 93) sobre los datos de la zona piloto A (Matasgordas) aporta información de cómo se comporta el error espacialmente al ampliar el tamaño del área analizada (escalas 2ª, 3ª y 4ª). A la escala más pequeña (la cuarta, con distancias típicas por debajo de unos pocos decímetros) la desviación típica de los datos es 3.1cm (de la curva experimental en la figura 5.16).

Los ensayos de inundación (5.3.2.a) y las comprobaciones sobre la rugosidad local de los puntos *ALS* (5.3.2.c) aportan datos importantes sobre las escalas de valoración del modelo 2ª, 3ª (para el primer método) y 4ª (para el segundo método). Los análisis realizados aportan información relativa sobre el “ruido” del modelo a esas escalas. El análisis del epígrafe 5.3.2.a evalúa y sitúa espacialmente las mayores disparidades entre las tiras de levantamiento después de su ajuste. Los valores mínimo y máximo entre los que oscilan son 0.03m y 0.19m (tabla 5.10). El análisis del epígrafe 5.3.2.c aporta información relativa sobre el ruido del Modelo Digital del Terreno a escalas menores, sobre las decenas de metros. Los intervalos de error de las disparidades ($P=95\%$) son de $\pm 0.043m$ o de $\pm 0.060m$ (sin y con solape respectivamente; tabla 5.11).

Estos análisis refuerzan la idea de que el modelo tiene una precisión mejor que una medida *LiDAR* puntual o aislada (debido a la homogeneidad de las medidas y la redundancia de información). Además también se comprueba que la precisión relativa en un entorno pequeño (escala 3 o 4) es mejor que la del modelo en su conjunto. De manera congruente con lo explicado hasta ahora, en estos análisis se comprueba que realmente el error del MDT es menor cuanto menor es el área considerada, con lo que parece confirmarse el tipo de modelo de error altimétrico propuesto por Crombaghs *et al.* [2002]. Como ejemplo de este hecho en la figura 6.3 se presentan cuatro cortes del MDT en el área de Matasgordas. Dos de ellos se han realizado en la Cañada Madre (P-1 y P-2) mientras los otros dos en un área de arenas con pequeños canales (P-4) y dos pistas paralelas que van hacia el Norte (P-3). En estos perfiles se cortan elementos con unas diferencias de elevaciones entre los 12 y 25cm (caños y pistas para el acceso rodado). Se destacan en el perfil 3 dos pistas separadas por una pequeña elevación de 12-15cm y 10m de ancho (1-figura 6.3, perfil P-3). Estos detalles altimétricos tan nimios quedarían difuminados por el error global del área de Matasgordas ($\varepsilon_{\sigma,z}=0.069\pm 0.125m$, tabla 6.1) si realmente los nodos cercanos al MDT estuvieran sometidos a tal ruido. Como se aprecia plásticamente en la figura 6.3, los perfiles contienen información morfológica de mejor calidad, lo que significa que a cortas distancias (escalas 3 y 4), el error del MDT es menor que ese ε .

En base al análisis del error según las cuatro escalas, ya citado (descrito en el epígrafe 3.2.1), y conocida la expresión en la cual la varianza total al cuadrado se puede descomponer en la suma de varianzas al cuadrado más un término de covarianzas, se propone en esta tesis la expresión semi-empírica E.6.1, adaptando el modelo de error altimétrico de Crombaghs *et al.* [2002]. En ella el error global para todo el levantamiento integra las cuatro escalas. Para modelar el espacio entre escalas se usa un modelo Gaussiano (variación exponencial de las varianzas entre escalas). Para resaltar la estructura de la fórmula y el ámbito de actuación de cada error, se han sustituido las varianzas por las diferencias de varianzas con la escala precedente, y agrupando términos:

$$\sigma(h) = \sqrt{\sigma_4^2 + (\Delta\sigma_{34}(h))^2 + (\Delta\sigma_{23}(h))^2 + (\Delta\sigma_{12}(h))^2 + (\Delta\sigma_{G1}(h))^2} \quad (\text{E 6.1})$$

en donde:

h = distancia entre el punto central de la ventana y un extremo

$\sigma(h)$ = desviación estándar del modelo para un tamaño de ventana h

$m_{ij}(h) = (1 - \exp(-(h/h_{ij})^2))$

$\Delta\sigma_{34}(h) = \sqrt{\sigma_3^2 - \sigma_4^2} \cdot m_{34}(h)$

$\Delta\sigma_{23}(h) = \sqrt{\sigma_2^2 - \sigma_3^2} \cdot m_{23}(h)$

$\Delta\sigma_{12}(h) = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \cdot m_{12}(h)$

$\Delta\sigma_{G1}(h) = \sqrt{\sigma_G^2 - \sigma_1^2} \cdot m_{G1}(h)$

$\sigma_4, \sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$ y σ_G = desviaciones para las escalas 4ª, 3ª, 2ª, 1ª y global

$h_{G1}, h_{12}, h_{23}, h_{34}$ = distancias de cambio de escala, a la que se incorpora el error del primer índice

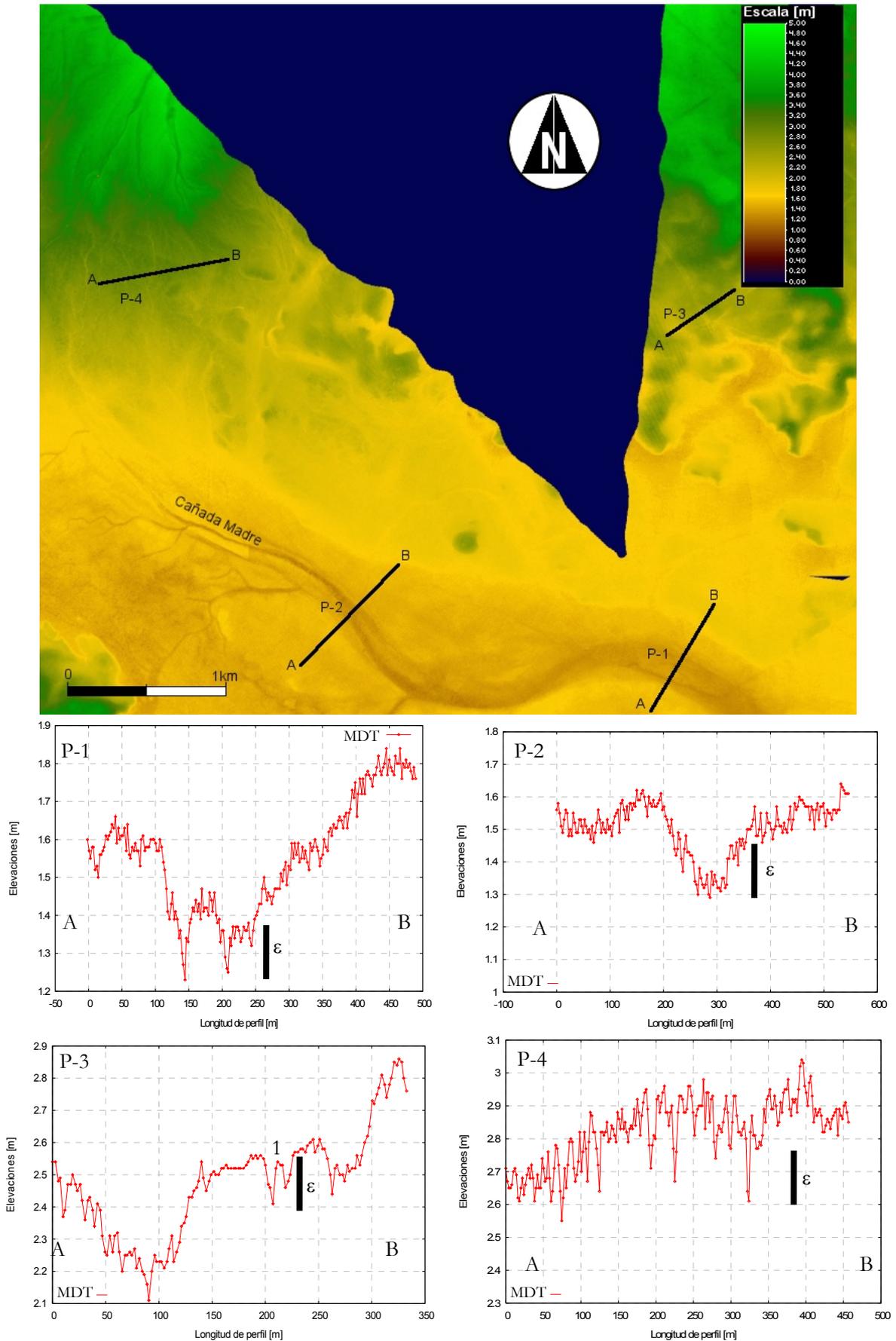


Figura 6.3. Perfiles en el área de Matasgordas sobre el Modelo Digital del Terreno. En cada perfil se ha añadido una barra de referencia con el error obtenido globalmente para la zona de Matasgordas (tablas 6.1 y 5.5). Se ha marcado con 1 los dos caminos que cruzan un área de arenas en el perfil P-3.

La expresión se ha aplicado al caso práctico analizado. Los resultados se presentan en la figura 6.4. La función expresa la estructura espacial del error en el levantamiento *ALS*. Para su construcción se ha usado la información resumida en la tabla 6.1, los análisis sobre el área de Matasgordas, y comprobaciones específicas como los valores del ajuste de las tiras del levantamiento (etiquetados “Val. Ajuste tiras” en la figura 6.4) y la evaluación del error local en zonas planas (epígrafe 5.3.2.c). La curva obtenida define cuál es la estructura espacial del error *LiDAR* en el levantamiento de Doñana. Explica las formas visibles de la figura 6.3 (pistas, caños,...) y el hecho constatado de que el error del MDT es menor cuanto menor es el área considerada.

Para incluir la información de los valores de ajuste de las tiras del levantamiento se ha considerado que los valores de la tabla 5.10 son el 99.9% del intervalo de confianza (epígrafe 5.3.2.a). Se han dividido por 3 para obtener las desviaciones típicas. Los valores mínimos ($H2-H1$) se han situado a 180m ($2b$), que es el ancho aproximado del área sin solapes de una pasada (ver figura 6.2); los máximos ($H3-H1$) a 330m, que es la distancia en la que se incluye una franja sin solape y otra con solape (188m+142m de la figura 6.2). La información de la evaluación del error local en zonas planas (epígrafe 5.3.2.c) se ha situado a tamaños de ventana pequeños (10m).

Se ha incluido también el análisis con y sin solapes en el área de Matasgordas (tabla 5.6; pg. 92). Los valores sin solapes se han situado a 330m porque se ha considerado que en esta zona la mitad de las pasadas tienen un único solape lateral (ver figura 5.15), y el ancho sin solape de estas pasadas es el valor indicado. Se ha asignado una incertidumbre a ese valor de 100m para reflejar la presencia de pasadas con dos solapes laterales. La desviación típica para los puntos en zonas con solapes se ha situado desde los 500m (coincide con el ancho aproximado de una pasada) hasta los 1500m que es la dimensión mínima de toda el área con puntos de comprobación (zona piloto A).

Por último se ha incluido el análisis geoestadístico del área de Matasgordas (figura 5.16) y la información global (puntos singulares; tabla 6.1). Estos últimos se han situado a 20km que es aproximadamente el ancho mínimo del levantamiento.

Antes de ajustar la expresión E.6.1 a los datos de la figura 6.4 se ha comprobado que todos los análisis son coherentes entre sí; el valor menor del análisis geoestadístico coincide con los valores del análisis de evaluación del error local, y los mayores valores (de los máximos y los mínimos) del análisis del ajuste de las tiras del levantamiento son también coherentes.

El ajuste se ha realizado de forma manual. La curva obtenida se ha ajustado para que sea la envolvente superior aproximada de los valores obtenidos. En primer lugar se han fijado los valores h_{ij} ajustándolos a las escalas ya comentadas al presentar la figura 6.2. Estos deben entenderse como la distancia entre dos puntos del modelo a partir de la cual se incorpora el error o grupo de errores asociados a cada escala. Así los errores asociados a la posición *GPS* se dan en la dirección de las pasadas cada 70-100m (velocidad del avión en m/s) y por tanto $h_{34}=35m$ ($70m/2$). Del mismo modo el paso de la escala 3^a a 2^a se da cuando el tamaño de la ventana es el expresado en la figura 6.2; 188m ($h_{23}=188/2\approx 95m$). El resto de valores h_{12} y h_{C1} se han obtenido de forma análoga, siendo 500m y 5000m respectivamente.

Por lo que respecta a las desviaciones típicas los valores extremos son, por un lado, el valor de los puntos singulares del P.N. de Doñana (primer valor tabla 6.1) y por otro lado el valor mínimo del análisis geoestadístico del área de Matasgordas ($\sigma_G=7.9cm$ y $\sigma_4=3.3cm$ respectivamente). El resto de valores son los que se han ajustado. Como primera aproximación para σ_1 se ha usado el valor 6.4cm que es la desviación típica del área piloto A (tablas 5.5 y 6.1). Los valores finalmente adoptados son $\sigma_3=4.2cm$, $\sigma_2=6.0cm$ y $\sigma_1=7.3cm$. El resultado se presenta en la figura 6.4.

Con esta metodología se define con mayor propiedad cuál es el error del modelo para una ventana dada. Es una valoración empírica que depende de la información de referencia disponible. No se limita a dar un valor genérico o en función del ambiente de un área en concreto de un levantamiento. El error del modelo, calculado a partir de la desviación típica (sin considerar “bias”, $\varepsilon=1.96\cdot\sigma(h)$), se encuentra entre los 6.5cm ($b=10$) a cortas distancias y los 15.5cm ($0.079\cdot 1.96$, de la tabla 6.1) en grandes extensiones. Esta expresión del error es más rica que dar un valor único como es habitual. En el caso de áreas llanas como la estudiada, donde el error *LiDAR* es cercano a la precisión requerida, este análisis tiene todo el sentido y estas diferencias pueden llegar a ser significativas. Por ejemplo, con esta estructura de error se explica porqué los elementos como los caños, los canales o las pistas de acceso quedan representados correctamente en el MDT *ALS*, a pesar de ser detalles de una

elevación relativa entre 12 y 25cm, inferior o cercana al error global de la zona de estudio (15.5cm o ε en la figura 6.3).

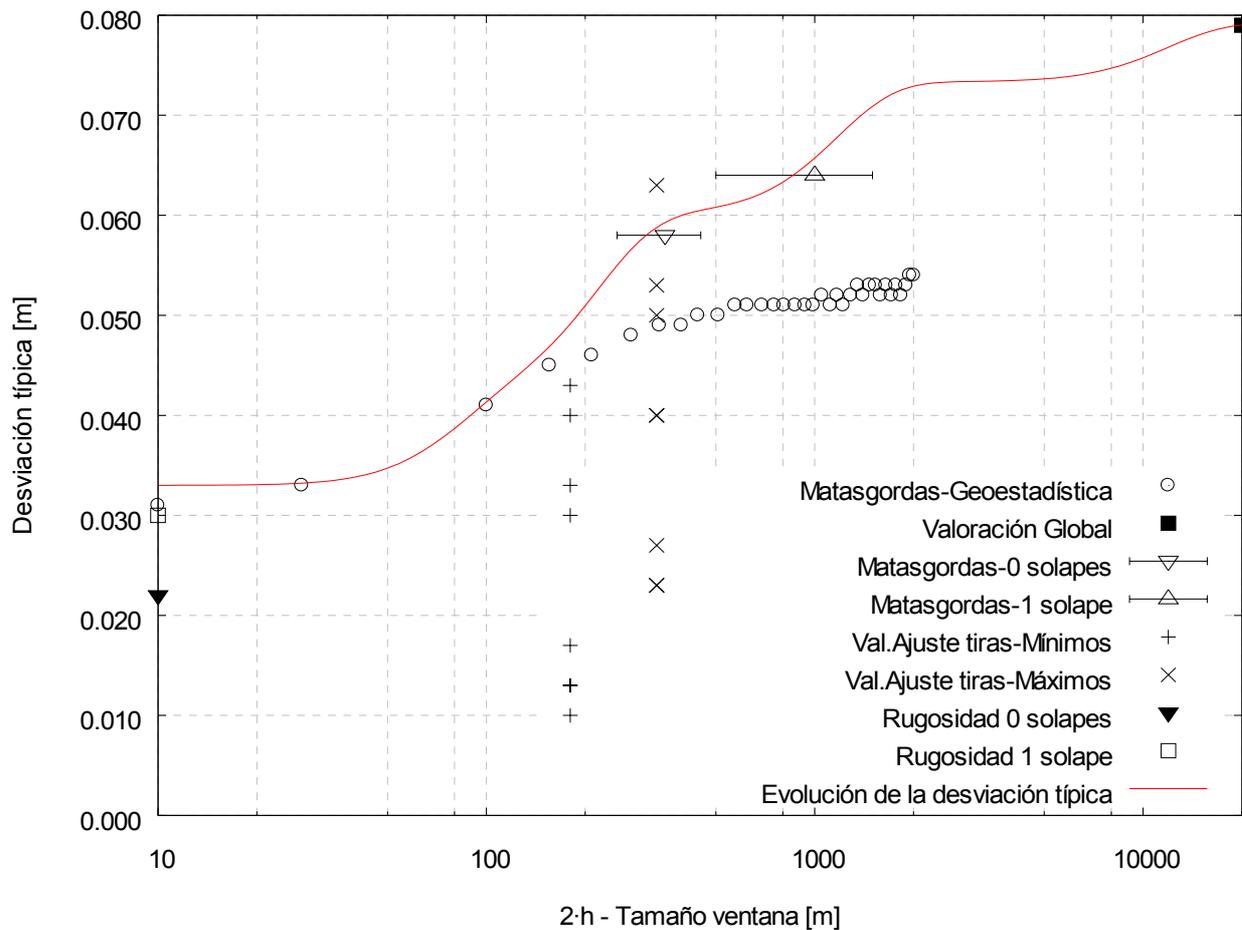


Figura 6.4. Estructura espacial del error *ALS* para el caso del Parque Nacional de Doñana. Se ha usado el modelo de desviación típica empírico E.6.1 a partir de las comprobaciones cualitativas y cuantitativas realizadas.

6.1.3. Resumen de la validación cualitativa

En los epígrafes 6.1.1 y 6.1.2 se ha valorado de forma global y local (en áreas) la calidad del modelo. Se ha podido trabajar en áreas llanas, donde las técnicas de reconocimiento de entidades expuestas en el capítulo 3 son de difícil aplicación. Además, se ha observado cómo los errores en el modelo se distribuyen espacialmente fruto del procesado *ALS*. También se han acotado los valores de este error para cada escala de trabajo definiendo empíricamente un modelo de error altimétrico.

Pero todo este trabajo analítico no es capaz de evaluar toda la información contenida en el MDT. Es necesaria también una valoración cualitativa sobre la calidad del modelo en todo su conjunto. Esto requiere un conocimiento del área y comporta un cierto trabajo de campo. En el caso analizado, a través del análisis cualitativo definido en el capítulo 3, se han comprobado un conjunto de puntos que se resumen a continuación (desarrollados en el capítulo 5).

En primer lugar se ha comprobado el ajuste del levantamiento al perímetro del contrato y la presencia de islas en el modelo. En ambos casos se han encontrado irregularidades (epígrafe 5.3.1.1).

También se ha demostrado la utilidad de los mapas de densidad y penetración. Estos detectan áreas potencialmente problemáticas por el efecto de bajas densidades, que como se ha mencionado, es una de las fuentes importantes de error en un MDT generado con el sistema *ALS* (epígrafe 5.3.1.2).

Otra comprobación realizada ha sido evaluar la efectividad del tratamiento automático del filtro de clasificación de puntos empleado. Esto ha sido posible gracias a que fuera del perímetro de contrato se ha aplicado un tratamiento automático. Las diferencias en el tratamiento de los mismos elementos dentro y fuera dicho perímetro han permitido evaluar la calidad del tratamiento manual y la eficacia de los dos filtros usados. Estas diferencias explican gran parte de los errores de clasificación de la nube de puntos expuesta en el epígrafe 5.3.1.4.

Para la generación del MDT *ALS* no se habían tratado específicamente las áreas inundadas. Ni se habían delimitado para indicar que no son terreno, ni editado las elevaciones para evitar falsas presas provocadas por falsos puntos elevados (figuras 5.31 y 5.32) o por las mareas (figuras 5.29 y 5.30). El tratamiento incorrecto de algunas de estas áreas se explica por su situación fuera del límite de contrato.

La verificación de los diques o muros que controlan los flujos de agua en la Marisma es uno de los puntos más importantes que se han validado. A veces estos elementos son clasificados por los filtros de la nube de puntos como objeto (figura 5.36, pg. 114). Su preservación requiere un esfuerzo en la generación de líneas de rotura, ya que allí donde no se han generado, muy frecuentemente, los diques y muros han sido eliminados del MDT indebidamente (figura 5.37, pg. 113).

La detección y tratamiento de errores del sistema *GPS/INS* se ha revelado como básico en un área llana, tan sensible a los errores en algunos puntos estratégicos. Se ha inspeccionado su incidencia en el levantamiento *ALS* y algunos de ellos han tenido efectos críticos, como las secciones (brechas) en los diques que cierran la marisma del Parque Nacional y que se han presentado en la figura 5.38. La mayoría han tenido una incidencia local como el artefacto presentado en la figura 5.54 en el Lucio de los Ánsares (pg. 133). Su detección en el modelo es posible con procedimientos semiautomáticos (propuestos en esta tesis), como se mostrará en el epígrafe 6.2.

Un punto esencial para detectar errores en la red de drenaje (básico en un área como la marisma de Doñana) es la detección de falsas presas (como se presenta en la figura 5.45 de la pg.122 y la figura 5.51). Estos elementos cambian el funcionamiento de la red de drenaje y los flujos de agua en el modelo. El método propuesto permite detectar de forma semiautomática estas falsas presas (figura 5.51) si están dentro del cauce, siendo siempre necesaria una supervisión de los resultados (epígrafe 5.3.2.a).

El último punto que se ha comprobado (también básico para la definición de un buen MDT para aplicaciones hidráulicas) es el tratamiento del sistema de compuertas de la Marisma. Su detección es posible, con un gran esfuerzo, con la observación de la ortofotografía y el conocimiento del área, y siempre sujeto a errores (de detección y de omisión). Para incluir cada elemento se ha requerido trabajo de campo para definir correctamente su geometría (en el anejo II se incluye el tratamiento de las compuertas detectadas en el perímetro del Parque Nacional).

Para el control del levantamiento se han realizado vuelos virtuales en 3D a baja altitud sobre el MDT superponiendo, en caso de duda, la ortofotografía. Se han grabado unos videos con estas pasadas cubriendo todo el levantamiento. Estos se adjuntan en el anejo IV. Se ha comprobado también que la detección de falsos puntos bajos con el modelo invertido es más efectiva.

Todas las disparidades se presentan en conjunto en la figura 6.5. Para una observación detallada de las imperfecciones encontradas en el modelo se incluye también la figura en alta resolución en el citado anejo IV.

En la figura 6.5 destacan por su continuidad e importancia las zonas en azul cian, que delimitan áreas con facetas triangulares ostensibles (proviene de la *TIN* creada antes de pasar a la malla regular, ver epígrafe 5.1). En esas zonas fuera del perímetro de contrato (principalmente arrozales) el filtro de clasificación de la nube de puntos ha eliminado puntos del terreno indebidamente (como se ha mostrado en la figura 5.44; pg.121). En general, el filtro ha tenido dificultades en algunas zonas de vegetación densa y húmeda (juncos y arrozales) debido a que la vegetación ha provocado una menor penetración de los pulsos láser, disminuyendo la densidad de puntos terreno y generando problemas de representatividad del terreno (figura 5.43). Otra zona azul cian aparece en las áreas de dunas activas, al Sur de la figura 6.5. Del epígrafe 5.3.1.4 se desprende que el problema radica en que los parámetros del filtro de clasificación han sido calibrados para el ambiente marisma. En las dunas, con pendientes

localmente importantes, el mismo filtrado ha conducido a la eliminación de las crestas de las dunas (se han clasificado como objeto) allí donde no se han generado líneas de rotura (áreas con tratamiento automático).

En el epígrafe 6.2 se proponen estrategias y mejoras en los filtros de clasificación de los puntos *LiDAR*. En este epígrafe de conclusión sobre la calidad del modelo, se ha de tener en cuenta que la inmensa mayoría de estas zonas azul cian están fuera del perímetro de contrato y por ello no han sido supervisadas manualmente.

6.1.4. Conclusión sobre la calidad del MDT *ALS* en Doñana

El conjunto de reparaciones que se han aplicado al Modelo Digital del Terreno para que sean aplicables estudios de hidráulica superficial se incluyen en el anejo II (en formato digital en el anejo IV).

Actuaciones posteriores al vuelo *LiDAR* de 2002, dentro del proyecto Doñana 2005, han modificado toda el área de la Finca de los Caracoles incorporada al Parque Nacional (1, figura 4.1). No se ha incluido ningún tipo de modificación en el área para reflejar estos cambios. Por otro lado dentro de este mismo proyecto se han cambiado las compuertas que cierran el perímetro del Parque Nacional, para hacerlo más permeable. Los cambios en las compuertas que han podido ser detectados sí han sido actualizados (anejo II).

En la tabla 6.2 se presenta el total de reparaciones realizadas al modelo, agrupadas por conceptos. Se indica si se ha considerado que eran errores críticos, el número de nodos del MDT, si han sido añadidos o ha reemplazado nodos del modelo y el porcentaje que supone respecto al total de nodos del MDT. El número tan elevado de nodos del concepto áreas se debe a que contienen todas las zonas que se han reclasificado por completo sin aislar cada concepto de error, pues eran generalizados (esencialmente fuera del perímetro de contrato). Con los diques se ha seguido un proceso similar. Los resultados completos constituyen el anejo II. La información digital de estas correcciones se incluye en el anejo IV donde se pueden encontrar imágenes de las zonas corregidas o bien archivos con los valores numéricos de la cota en los nodos del modelo que han sido añadidos o modificados.

Tabla 6.2. Resumen de resultados de las correcciones realizadas al MDT *LiDAR* en el Parque Nacional de Doñana.

Concepto	Crítico (S/N)	Puntos	Añadidos/Modificados	Porcentaje de nodos tratados
Áreas no levantadas	S	1054897	A	0.76%
Compuertas/Pasarelas	S	4128	M	0.002%
Diques	S	1895092	M	1.37%
Áreas	N	43781162	M	31.58%
Cauces, canales y lagunas	S/N	2152037	A/M	1.55%
Artefactos	N	137620	A/M	0.09%
Vegetación	N	2182	M	0.001%

Como resumen se puede decir que se ha validado el MDT frente a la información de referencia disponible. Las comprobaciones cuantitativas y cualitativas han permitido detectar una serie de errores que se han valorado y corregido. El número total de puntos afectados por errores que se pueden considerar críticos es un número aceptable.

Con ello se ha mostrado que la tecnología *ALS* es idónea para levantamientos en áreas morfológicamente parecidas al Parque Nacional de Doñana. Se observa en el modelo una gran cantidad de información morfológica con una resolución mayor que la que permitiría el error global del modelo. Esto se debe a que a la escala de estos elementos el error es menor, como ya se ha mostrado en el epígrafe anterior.

También se ha comprobado el comportamiento hidráulico de la Marisma mediante ensayos de inundación simples con la inspección visual del progreso de la inundación (ensayos estacionarios; imágenes de la inundación en el anejo IV).

Dentro de este epígrafe cabe recalcar que es grave que algunas áreas inundables no hayan sido cubiertas por el levantamiento, debiéndose realizar un trabajo adicional para completar el modelo. Tanto en este punto

como en otras reparaciones del modelo se ha constatado la conveniencia de conocer el terreno y de hacer trabajo de campo para encontrar la solución adecuada a los problemas.

Así, del conjunto de verificaciones cuantitativas (generales y específicas), y como consecuencia de todas las inspecciones cualitativas (visuales y analíticas) del MDT, se acepta el modelo, con unos errores (accidentales) caracterizados por la tabla 6.1 y las figuras 6.4 y 6.5. Se considera que el modelo es apto para las aplicaciones hidráulicas que se implementarán aunque deberán aplicarse las reparaciones que se han recogido en los anejos II y IV.

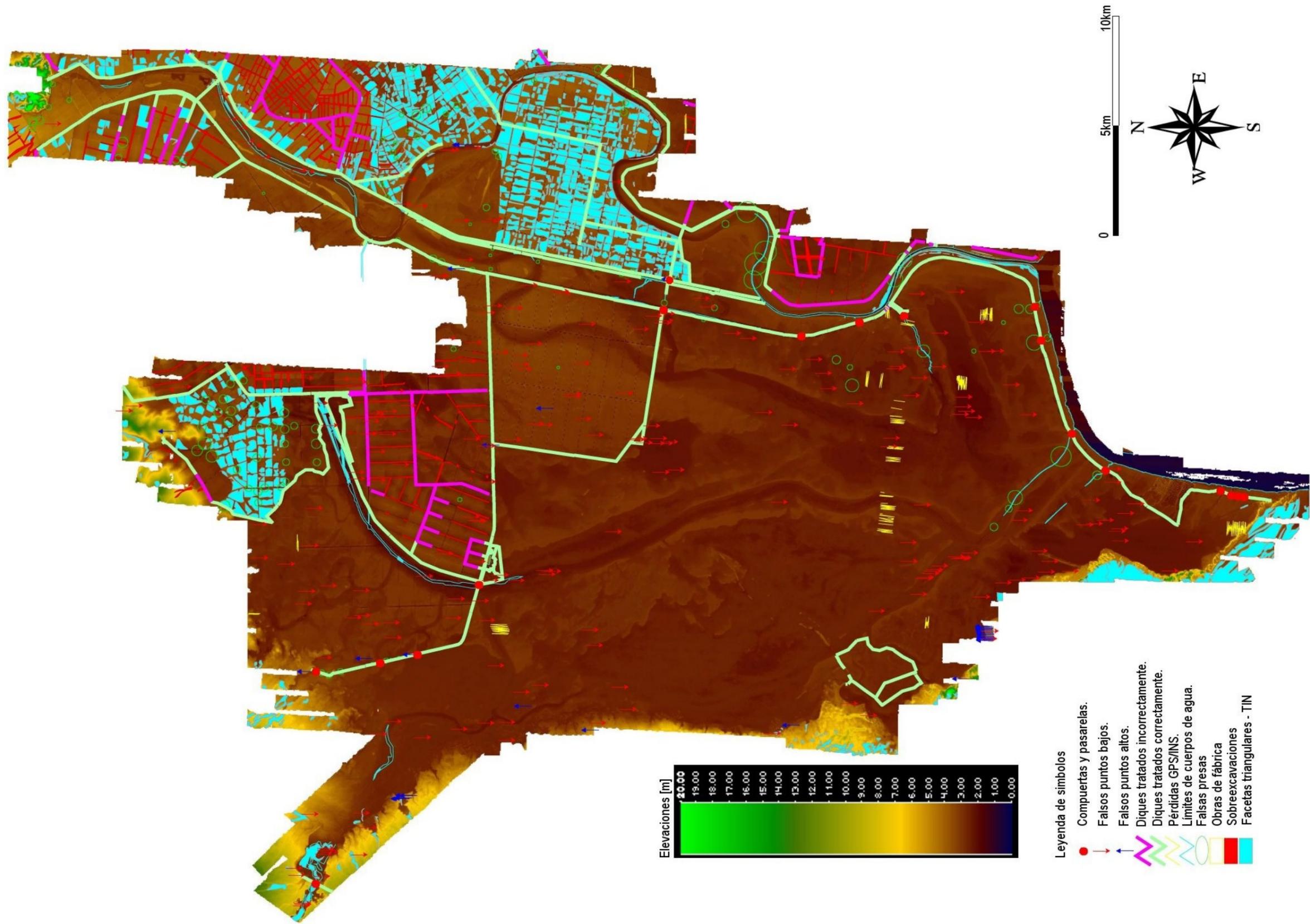


Figura 6.5. Levantamiento *LiDAR* de la marisma del P. N. de Doñana y alrededores. Presentación conjunta de las disparidades, errores y artefactos detectados y tratados a lo largo de la validación cualitativa del capítulo 5.

6.2. ESTRATEGIAS PARA LA GENERACIÓN DE MDT's EN ÁREAS EXTENSAS Y LLANAS

En el epígrafe anterior se ha comprobado la calidad del MDT analizado. El Parque se ha revelado como un excelente banco de pruebas para determinar la calidad de la tecnología *ALS* en áreas extensas y llanas, donde la precisión requerida está cerca de la máxima del sistema. El esquema de comprobaciones/validaciones también se puede aplicar a otras áreas con similares características.

En este epígrafe se presentan y discuten las posibles mejoras en la generación de Modelos Digitales del Terreno en áreas extensas y llanas, como el caso analizado.

Las áreas que se han denominado extensas y llanas se caracterizan por pendientes bajas y vegetación en general de bajo porte. En el capítulo 4 se han evaluado las pendientes de la marisma de Doñana. La media del levantamiento es 0.37° y su desviación estándar 0.87°, valores realmente bajos. El mapa de pendientes se presenta en el anejo IV.

En las áreas llanas se distinguen los ambientes urbano y no urbano. En el levantamiento *ALS* de Doñana el único poblado es El Rocío (0.4% del levantamiento). Así las estrategias propuestas en el resto del capítulo son sólo aplicables a áreas extensas y llanas no urbanas.

Del análisis de la calidad del Modelo Digital del Terreno resumido en el epígrafe 6.1 se han extraído conclusiones sobre algunas de las problemáticas de la tecnología *ALS*. Se han confirmado las dificultades de penetración en vegetación densa y húmeda, y algunos problemas de los filtros de clasificación, identificando las causas y proponiendo mejoras.

6.2.1. Estrategias sobre los filtros de clasificación de la nube de puntos *ALS*

El rendimiento del conjunto de filtros de clasificación de la nube de puntos no ha sido efectivo al 100% en el área del levantamiento. De la comparación cualitativa en las áreas donde se ha aplicado un tratamiento automático con las tratadas de forma manual se desprende que el coste de supervisión manual ha sido elevado (figura 5.44). Gran parte del coste se debe a la inclusión en el MDT de elementos artificiales como los diques (muros, epígrafe 5.3.1.4). Los filtros de clasificación de la nube de puntos pueden identificar los diques como objeto y se requiere generar líneas de rotura para que sean preservados. También se requieren en los bordes de los canales para que sean preservados. La definición y comprobación de líneas de rotura sobre los diques y canales es un proceso costoso en tiempo. El resto de procesos que aumentan los costos de edición son de verificación del modelo, que no son fácilmente automatizables. En el epígrafe 6.2.2 se proponen algunas estrategias para semiautomatizar algunos procesos de verificación del modelo en áreas morfológicamente parecidas a la del Parque Nacional de Doñana.

En este epígrafe se describen posibles mejoras sobre los procedimientos realizados en la clasificación de la nube de puntos. Estas propuestas tienen como objetivo mejorar el resultado “automático” de la clasificación, disminuyendo la importancia y coste de la tarea de supervisión o edición manual. En el epígrafe 6.2.1.1 se incluyen las relativas a los parámetros del filtro de clasificación, y en el 6.2.1.2 la comparación con otros conceptos de filtro y las características de un posible filtro óptimo para Doñana.

6.2.1.1. Rendimiento y mejoras del filtro de clasificación de la nube de puntos *ALS* usado en el caso práctico

a) Ancho de ventana del filtro

En el capítulo 5 (figura 5.48) se ha presentado el caso de un edificio fuera del perímetro de contrato que no ha sido completamente eliminado del MDT tras la aplicación del filtrado (en esta zona no se ha aplicado supervisión

manual). El operador morfológico con el ancho de ventana mayor (descripción del filtro en el epígrafe 5.1.1) es el responsable de eliminar estos objetos. Si el ancho de ventana no es suficiente (menor que el lado en planta más pequeño del objeto) los puntos centrales del objeto se preservan, como ha sido el caso. Pero si el ancho de ventana es demasiado elevado se suaviza demasiado el resultado, debiendo llegar por tanto a un compromiso. En todo caso, el ancho de ventana que se usó en el filtro no ha sido suficiente.

Para verificar cuál habría sido el tamaño de ventana óptimo del operador morfológico, se ha usado el enunciado en Zhang *et al.* [2003] ampliado a 2D (descrito también en el anejo III; programa *FILTER*). Se ha usado una forma cuadrada para la ventana del filtro. Se ha variado el tamaño de la ventana del filtro de menor a mayor hasta eliminar el edificio con un ancho de 14m. Los parámetros usados han sido: pendiente límite 5° (s_0 , anejo III), umbral mínimo de diferencias de elevaciones al modelo suavizado de 0.2m (dH_0), y umbral máximo de 1m (dH_m).

En la figura 6.6 se presentan los resultados del caso estudiado. En la subfigura A se presenta el Modelo Digital de Superficie (MDS) en el que se identifican los objetos presentes en el área (descritos en el pie de figura). En la subfigura B se presenta el Modelo Digital del Terreno (MDT) original. En la subfigura C se presenta el MDT modificado realizado con los puntos clasificados como terreno después de aplicar un filtro morfológico con una ventana máxima de 14x14m (con los parámetros mencionados en el párrafo anterior). En la subfigura D se presentan las diferencias entre los dos modelos generados.

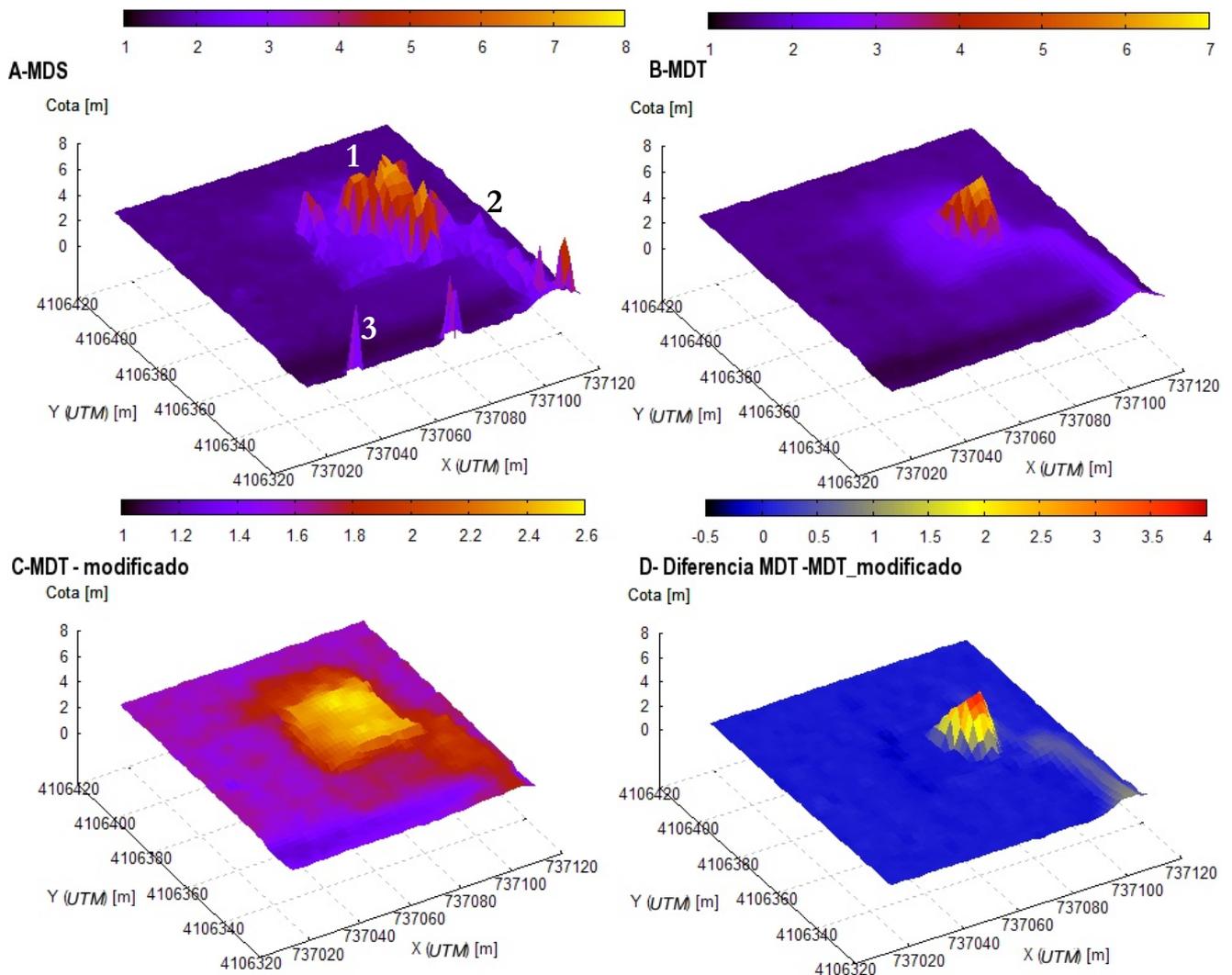


Figura 6.6. Detalles del reproceso del MDT en la casa del Lucio del Lobo variando el ancho de la ventana. **A:** Modelo Digital de Superficie original (1, casa; 2, camino de acceso; 3, vegetación adyacente al muro de la Confederación). **B:** MDT del modelo original con restos de la casa. **C:** MDT modificado con los puntos del terreno después de aplicar un filtro morfológico con un ancho de ventana de 14m. **D:** Diferencias entre el modelo original (B) y el recalculado (C). Explicación en el texto. Coordenadas UTM huso 29N en metros. Datum ED50.

Del análisis se deduce que con una ventana máxima de 14x14m este elemento habría sido filtrado correctamente de forma automática. En la subfigura se observa que el camino que da acceso a la casa ha perdido su parte más elevada, evidenciando que para otros elementos este ancho puede ser excesivo.

Otra opción alternativa a la variación del ancho de la ventana máxima del primer filtro de clasificación es la detección de estas áreas en el modelo tratándolas como falsos puntos elevados. La aplicación del algoritmo de detección de errores presentado en Felicísimo [1994] calibrado convenientemente podría corregir de forma “automática” este tipo de errores. Estos algoritmos pueden ser aplicados de forma sistemática a las áreas extensas y llanas, aunque la baja relación altura/ancho de estos elementos (figuras 5.34 y 5.35) hace difícil la calibración de los parámetros y su correcta aplicación.

b) Zonificación del filtro de clasificación

El principal origen de los problemas de clasificación automática es que el filtro se ha calibrado únicamente para la Marisma, que supone una gran parte del área del levantamiento (93%). Lo que funciona bien en la Marisma no va tan bien en las zonas adyacentes, o cuando se encuentran en la Marisma elevaciones o depresiones locales elevadas (diques y canales).

La zonificación del filtro de clasificación en ambientes y grupos según las características morfológicas medias del terreno ayudará a resolver esta situación. A continuación se presenta una metodología para extraer las áreas con mayores pendientes. El diagrama de flujo seguido se muestra en la figura 6.7. Para el tratamiento digital de la imagen se han usado programas propios (PNM) y de libre distribución como GIMP y IMAGEJ. Se encuentran descritos en el anejo III, en Mattis y Spencer [1997-2006] y en Rasband [1997-2006] respectivamente.

Para aplicar el proceso de zonificación, en primer lugar, se ha realizado un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con los puntos del último retorno (sin clasificar). Se ha escogido un tamaño de celda o *pixel* de 8x8m para minimizar los efectos de bajas densidades locales y el número de celdas sin puntos. Para determinar la cota de cada celda se ha usado la mínima de los puntos que caen en ella. Con este MDE se ha generado el mapa de pendientes al que se ha aplicado una expansión de contraste. Ésta se ha realizado con una ecualización del histograma de frecuencias tal y como se detalla en Chuvieco [1996]. Las celdas sin puntos se han dejado en negro (figuras 6.7 y 6.8.A).

El objetivo de los siguientes pasos es aislar las áreas con mayores pendientes que, o no son de la Marisma o pertenecen al sistema de diques, canales, cauces y caños.

El primer paso para extraer la información deseada ha sido aplicar un filtro de umbral. Se ha escogido un valor límite de $ND=226$ sobre la imagen de las pendientes con la expansión del contraste ($ND \in [0:255]$). Con este valor se ha comprobado que desaparecía suficiente información de la Marisma, preservando gran parte de la información del sistema de diques y canales y de las áreas con dunas activas o estabilizadas (figura 6.8.B). Al resultado se le han aplicado dos filtros. El primero (media) consiste en reemplazar el valor de cada celda de la imagen por la media de los valores originales de la ventana de filtro (en este caso de 3x3 celdas). Este suavizado elimina o reduce la información aislada. El segundo filtro (dilatación) selecciona el máximo de la ventana del filtro para cada celda. Esto refuerza los elementos lineales, conectándolos en el caso de que se encontraran ligeramente seccionados en la imagen.

En este punto se han corregido manualmente las conexiones entre áreas (1, 2, 3 y 4 de la subfigura 6.8.B). En las etiquetadas como 1 y 2 se han desconectado las zonas donde las pendientes se agrupan en los elementos lineales (diques y canales). En el área 3 se ha conectado el dique de la “Montaña del Río” en una sección que no se ha preservado. Esta edición manual se ha realizado para mejorar la solución del siguiente filtro.

A continuación se ha aplicado el filtro “Extracción de elementos lineales” usando el programa IMAGEJ (*process* → *binary* → *fill holes*). Utiliza una ventana de 8x8px (64x64m) eliminando los grupos de celdas (en blanco; $ND=255$) que no atraviesen toda la ventana. Todos los elementos no agrupados en el de mayor tamaño son eliminados una vez terminado el proceso. Los resultados de este filtro se presentan en la figura 6.8.C, donde se observa que con la edición manual ya comentada se ha extraído la red de diques y canales es su mayor parte. A

continuación, de la imagen de pendientes con expansión (N_{ij}) se le resta la imagen con los elementos lineales (NF_{ij}) para aislar la zonificación perseguida (subfigura 6.8.D). Por último, se ha aplicado un filtro con la media para eliminar las áreas de menor tamaño. Se destacan cuatro áreas donde el proceso no ha sido eficaz. El área 1 (subfigura 6.8.D) es el caño del Buen Tiro, donde debido a que el muro se encuentra seccionado (4, subfigura 6.8.B) no se ha eliminado con el filtro de extracción de elementos lineales. El área 2 es un muro aislado, mientras que la tercera es un canal aislado, y la cuarta es un conjunto de barras en el Brazo de la Torre.

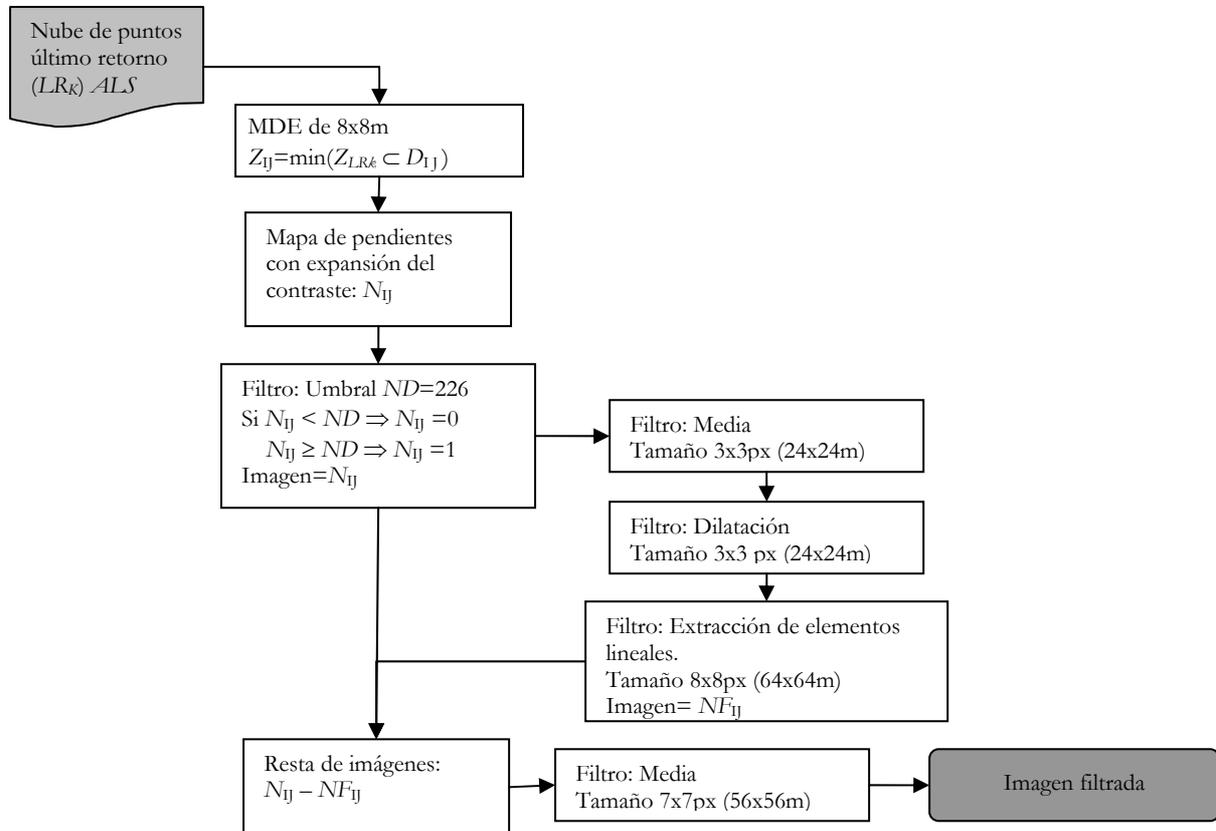


Figura 6.7. Esquema del algoritmo de zonificación aplicado al levantamiento *ALS* para detectar grandes áreas con mayores pendientes.

Para corregir los errores observados se ha recurrido al conocimiento previo que se tiene del área. Los ambientes dunar y “coto” (capítulo 4) se encuentran en zonas más elevadas que la Marisma. Se ha usado esta diferencia para eliminar las inconsistencias detectadas en el proceso mostrado en la subfigura 6.8.B (1 y 2). Se ha usado el contacto nítido entre estos ambientes y la Marisma (5, 6 y 7 de la subfigura 6.8.D) para inundar el MDT y eliminar las islas de agrupaciones de pendientes dentro del área de la Marisma. La cota de inundación usada ha sido de 1.83m. El resultado se presenta en la subfigura 6.8.E. Este último proceso no es generalizable a cualquier zona extensa y llana, y sólo es posible con un cierto grado de conocimiento del área del levantamiento, siempre conveniente.

Las áreas resultantes de este último paso se han completado y simplificado de forma manual (subfigura 6.8.E). Se han caracterizado las pendientes agrupándolas en tres áreas: dunas activas, dunas inactivas, y otros. Estas áreas se han etiquetado como A1, A2, y A3 en la subfigura 6.8.E. Los estadísticos de sus pendientes se presentan en la tabla 6.3.

La subfigura 6.8.F presenta las áreas con diques y canales (D0) que se han ampliado para asegurar un solape con los ambientes A*. Estas áreas reciben un tratamiento personalizado para su correcta clasificación. La única problemática que presentan para el filtro de clasificación es la presencia de vegetación en pendientes (se adosa al cuerpo del dique o canal y es difícil distinguir entre los retornos *LiDAR* del elemento y los de la vegetación).

Tabla 6.3. Estadísticos de las pendientes en las áreas definidas en la subfigura 6.8.E. N es el número de nodos del modelo de pendientes 8x8m incluidos en cada área. La pendiente, definida aquí como el ángulo de la normal a la superficie en un nodo con la vertical, su desviación típica y el RMS se da en grados sexagesimales.

Área	N	Media	σ	RMS
AT=Área total	8640585	0.37°	0.87°	0.95°
A1 (dunas activas)	210311	1.40°	2.02°	2.46°
A2 (dunas inactivas)	305926	0.83°	1.00°	1.30°
A3 (otras)	24007	4.87°	3.74°	6.14°
A0=AT-A1-A2-A3 (Marisma)	8100341	0.32°	0.72°	0.79°

Se observa en la tabla que las áreas definidas (A1, A2 y A3) son las que contienen las mayores pendientes. Al excluirlas de la Marisma, la pendiente media desciende (A0, tabla 6.3). El procedimiento propuesto consistiría en usar el resultado de la zonificación (subfiguras 6.8.E, F) para calibrar distintamente el filtro de clasificación en cada zona.

Se ha considerado la inclusión de la fusión con la ortofotografía para mejorar el proceso de zonificación. El primer paso para realizar este proceso es la clasificación de la imagen. En la ortofotografía se pueden identificar, entre otras cosas, los edificios, áreas inundadas, y las agrupaciones vegetales (desde grupos de eucaliptos, pinos aislados, o distinguir en la Marisma entre áreas con *almajos* y *juncos*). Pero es muy difícil identificar elementos como los diques. Así, la posible aportación de la ortofotografía al proceso de zonificación es la aparición de más zonas dentro de la marisma (A0) mejorando el proceso de clasificación. Este proceso no se ha implementado ya que los resultados obtenidos con la zonificación ya expuesta son de calidad suficiente en la Marisma y los errores detectados son locales.

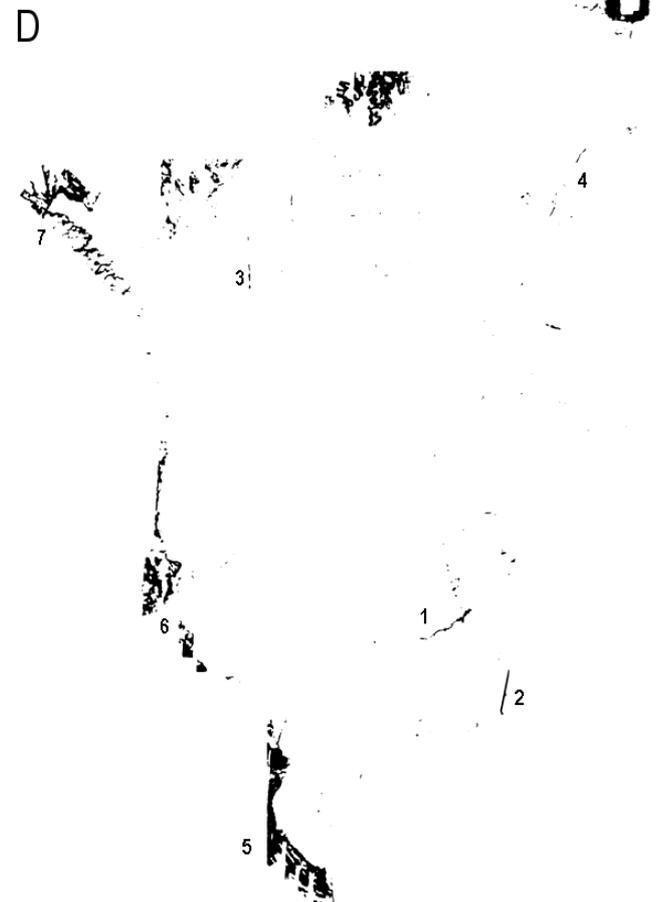
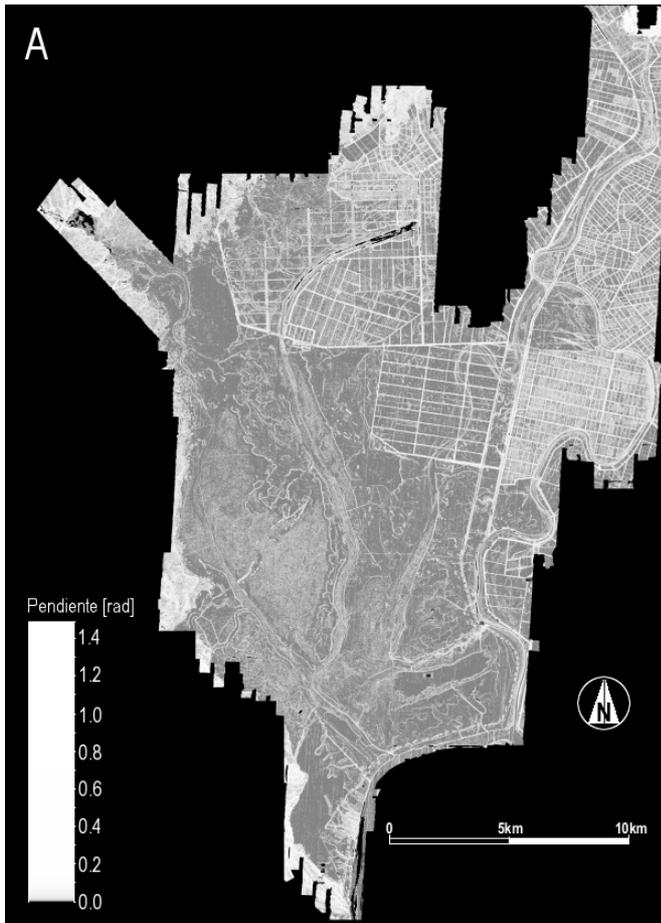
Se ha comprobado el resultado del cambio de los parámetros del filtro de clasificación según la zonificación en áreas donde la información de referencia permite evaluar la calidad de la nueva solución. Se ha usado la información que en el epígrafe 5.2.2 se ha identificado como zona piloto C (perfil T3). Esta zona se encuentra en el área identificada como A1 en la subfigura 6.8.E. Como filtro de la nube de puntos se ha usado el propuesto por Zhang *et al.* [2003], ya mencionado. Se ha usado el valor $1.96 \cdot RMS$ como pendiente límite para el filtro morfológico (s_0^1). Se han usado siete anchos de ventana (3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 *pixels*, de 2m de lado) y se han calculado los estadísticos. Los resultados sin excluir ningún punto se presentan en la figura 6.9. Estos estadísticos son mejores que los del MDT original (tablas 5.8 y 5.9), especialmente hasta la ventana de 7 *pixels*². Se aprecia como a partir de la ventana de 7 *pixels* empeoran los estadísticos debido a una pérdida de representatividad del terreno. Se pierde información en las crestas de las dunas y se generan planos donde faltan puntos ALS, aumentando la diferencia con la información de referencia del perfil T3 (medidas GPS-RTK).

En la figura 6.10 se presentan las diferencias entre el modelo recalculado y el original. Para generar los nuevos modelos se ha realizado una triangulación de *Delaunay* con la nube de puntos clasificados como terreno. Sobre el TIN se ha interpolado un modelo regular de 2x2m. En la figura se muestran las áreas (1 y 2) donde en el modelo original se habían eliminado las crestas de las dunas, las cuales son preservadas correctamente en el modelo recalculado.

Así se ha comprobado que para un ancho de ventana de 14m, superior al usado para el modelo original (2m), se obtienen mejores resultados “automáticos”. Además el proceso de zonificación propuesto, con pendientes adaptadas para cada zona, permite obtener en conjunto mejores resultados, y no sólo en la Marisma.

¹ S_0 Pendiente límite. Véase definición en el anejo III.

² Los resultados brutos son: $N=71$ puntos, $M=-0.118$ m, $\sigma=0.153$ m y $RMS=0.193$ m. Si se aplica el método del intervalo de confianza se excluyen dos puntos y los resultados son $M=-0.137$ m, $\sigma=0.102$ m y $RMS=0.171$ m. Estos son comparables con los de los epígrafes 5.2.2 y 6.1.1.



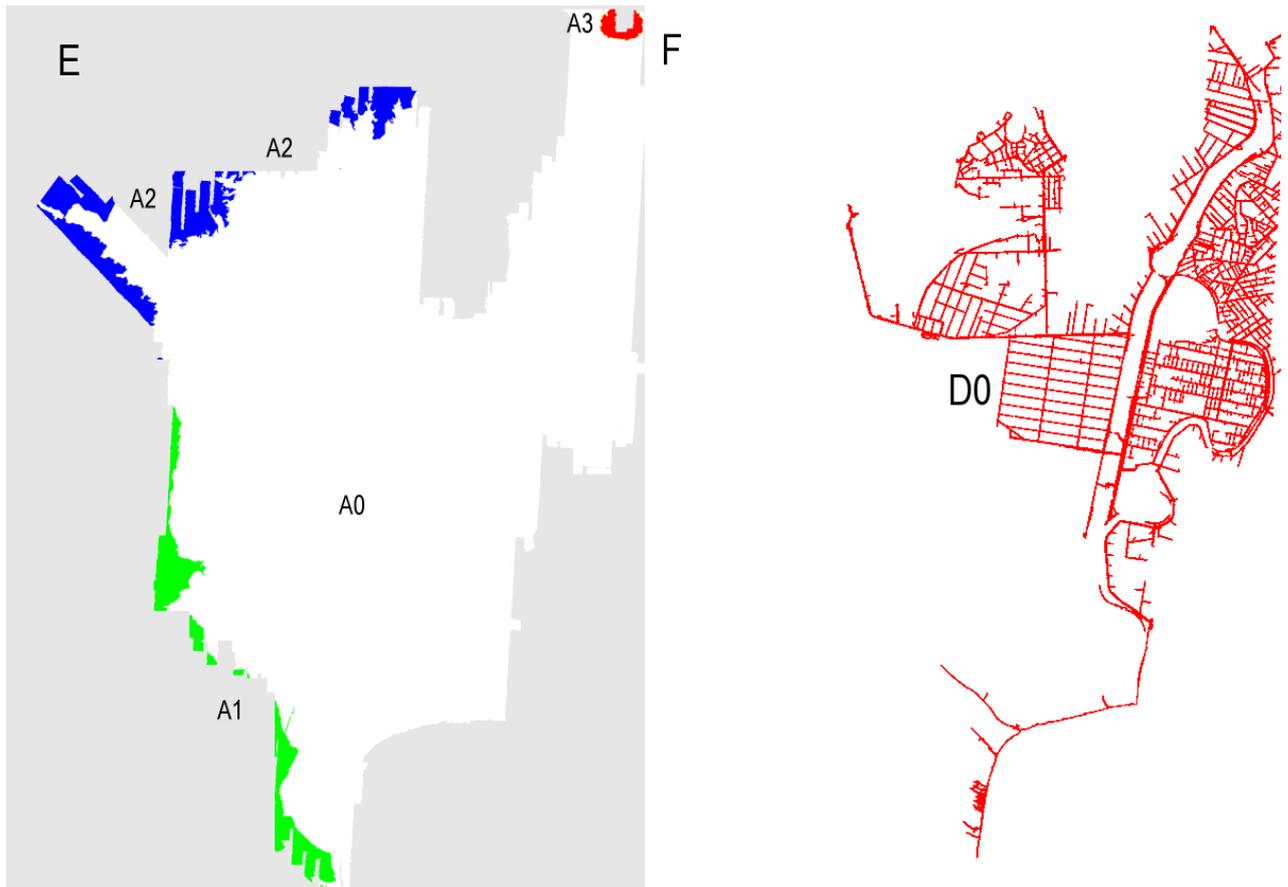


Figura 6.8 Aplicación del algoritmo de zonificación de la figura 6.7 al levantamiento *ALS* del Parque Nacional de Doñana. **A:** Mapa de pendientes ecualizado sobre un modelo de 8x8m. **B:** Imagen en blanco y negro con de la aplicación del umbral ($ND=226$). **C:** Imagen con los elementos lineales. **D:** Resultado bruto de zonificación. **E:** Resultado final de la zonificación. **F:** Sistema de diques aislado (D0) con un margen de solape tratado aparte de la zonificación (explicación en el texto).

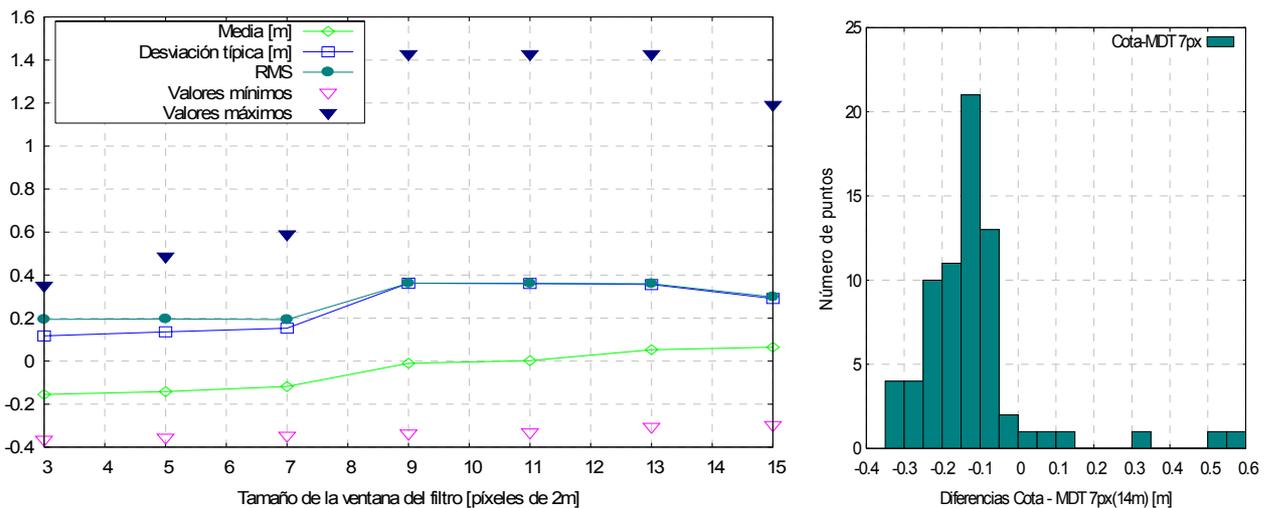


Figura 6.9. Perfil (o transecto) T3 en el Cerro de los Ansares (zona piloto C; epígrafe 5.2.2). Evolución de los estadísticos de los distintos modelos generados con los 71 puntos clasificados como terreno con distintos anchos de ventana. A la derecha se muestra el histograma de las diferencias entre los puntos *GPS-RTK* (referencia) y el modelo generado para el caso de ancho de ventana de 7 píxeles (14m).

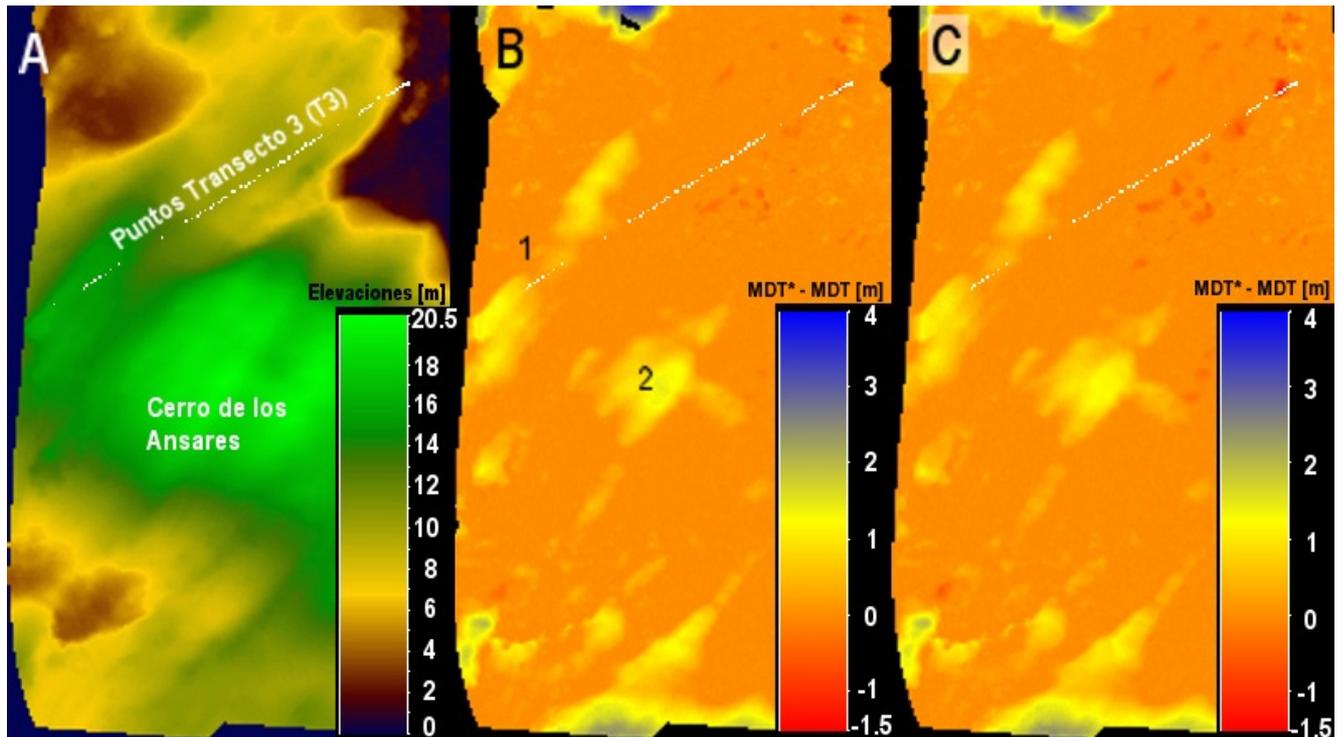


Figura 6.10. Perfil (o transecto) T3 en el Cerro de los Ansares (Zona piloto C; epígrafe 5.2.2). Comparación entre modelos generados con la reclasificación (MDT*) para dos anchos de ventana **A:** MDT original en el área. **B:** Diferencias entre el modelo generado con los puntos clasificados como terreno (MDT*) con un ancho de ventana de 7x7px (14x14m) y el MDT original. **C:** Igual que el anterior con un ancho de ventana de 9x9px (18x18m).

6.2.1.2. Rendimiento de otros tipos de filtro

En este epígrafe se valora la hipotética utilización de filtros distintos a los usados por FOTONOR y a los retocados en el epígrafe anterior. La valoración es bastante tentativa, puesto que no se han llegado a implementar. Por último se indican las características que debería tener un filtro óptimo para Doñana y, por tanto generalizable a áreas similares.

En el capítulo 2 (epígrafe 2.2.3.1) se han expuesto las principales estrategias de clasificación de la nube de puntos. En Sithole y Vosselman [2003] y [2004] se realizó una comparación de 8 filtros de distintos autores en 8 áreas de ensayo (4 urbanas y 4 no urbanas). De ambos trabajos se han extraído los ambientes presentes en el área levantada de Doñana (tabla 6.4). En la tabla se ha añadido la valoración del comportamiento automático del filtro usado en el procesado realizado por FOTONOR (última columna).

A pesar de la diferencia en el terreno base entre las columnas ABCD y la E, la comparación entre comportamientos es aplicable. Así, valorando globalmente los resultados, se desprende que los conceptos de filtro A, B, C y D podrían funcionar a priori mejor que el usado (E). Para los ambientes seleccionados, los dos conceptos de filtro con mejor valoración son los basados en un bloque mínimo (B) y los basados en superficies (C).

Así un filtro específico para terrenos como Doñana debería tener las siguientes características:

- *Zonificación.* Como se ha mostrado en el epígrafe anterior, la segmentación en ambientes mejora el rendimiento de los filtros de clasificación de puntos posteriores.
- *Fusión con información multispectral de alta resolución.* Su información clasificada puede usarse para detectar áreas problemáticas, para mejorar el proceso de zonificación o integrarlo en el proceso de clasificación de la nube de puntos *LiDAR*. En este caso se disponía de una ortofotografía realizada en la misma época que el levantamiento *ALS*. Como ya se ha indicado en el capítulo 4 en la Marisma las clases de agrupaciones vegetales definidas están en relación directa con la elevación del

terreno. Cada vegetación tiene una penetración distinta de la señal *LiDAR* (como ya se ha mostrado en el apartado de vegetación del epígrafe 5.3.1.4). En la Marisma se han encontrado problemas de representatividad del MDT con vegetación tipo castañuela-juncos. En la figura 6.11 se muestra que esta vegetación es detectable en la ortofotografía (1 y 2) y por tanto, es posible aplicar un tratamiento especial a estas áreas (restringir algunos parámetros del filtro de clasificación como la pendiente o el umbral de alturas y aplicar un suavizado al MDT para evitar la presencia de facetas triangulares; figura 5.42). Más compleja es la clasificación de la imagen en las agrupaciones vegetales descritas en el epígrafe 4.2, como se ha explicado en el epígrafe anterior (*vegetación acuática de caños, marisma de castañuela y juncal, marisma de almajos, vegetación de saladares y espartina*). Usando la información que cada agrupación de vegetación tiene un rango de elevaciones asociado, se puede fusionar esta información con el proceso de zonificación (añadiendo más grupos) o integrarlo dentro del proceso de clasificación de puntos (usando la información altimétrica relativa de las áreas ocupadas por cada agrupación vegetal con un algoritmo de agrupación/segmentación). Estas dos últimas aplicaciones de la fusión requieren un trabajo adicional para asegurar su correcta implementación.

Tabla 6.4. Valoración aproximada del comportamiento de diversos conceptos de filtro de clasificación de la nube de puntos *ALS* en levantamientos en áreas llanas. Se incluye la valoración del filtro usado en el vuelo del Parque Nacional de Doñana (E). El comportamiento de los filtros (A, B, C y D) se ha extraído de los trabajos de Sithole y Vosselman [2003] y [2004].

Ambientes / Elementos	A. Basados en la pendiente	B. Basados en un bloque mínimo	C. Basados en superficies	D. Agrupación / segmentación	E. Algoritmo FOTONOR. A.S.
Puntos Falsos					
Puntos elevados	B	B	B	B	B/R
Influencia	B	B	B	B	B
Puntos Bajos	R	B	B/R	B	R
Influencia	B/M	B	B	B	R
Objetos					
Alargados	B/R	B	B	B	R/M
Pequeños	B/R	R	B/R	R	B/R
Bajos	B/R	B	R/M	B	B
Adosados (Puentes)	B(E)	B(E)	B(E)/F	B(E)	M
Vegetación					
General	B	B	B	B	B
Baja	R	B	B/R	R	B/R
Discontinuidades					
Preservación	M	R	R/M	M	M

B= bien al menos en el 90% de los casos. R= regular (bien tratados entre el 50 y el 90% de los casos). M= mal (bien tratados en menos del 50% de los casos). E=Se elimina el elemento en todos los casos correctos.

- *Filtro de clasificación de la nube de puntos: basado en superficies o en un bloque mínimo*, que cómo ya se ha explicado ofrecen un mejor comportamiento (tabla 6.4).
- *Identificación de diques y canales* para practicar en estas áreas un tratamiento especial. Este proceso se ha resuelto con la zonificación del epígrafe anterior. Algunos autores como Sithole y Vosselman [2003] y [2004] proponen que el filtro de clasificación no sólo diferencie entre terreno y objeto, si no que sea capaz de detectar distintas clases de objetos. Así, en función del uso del modelo generado se pueden incorporar los objetos que se consideren necesarios. En este caso, dentro de los objetos se debería distinguir entre los objetos lineales (diques y canales), objetos sin penetración no lineales (edificios) y vegetación. Este planteamiento se esquematiza en la figura 6.12, donde se distinguen los cuatro grupos necesarios en áreas como Doñana y cuál es la información que se ha usado para cada modelo; MDT y MDS.
- *Detección semiautomática de compuertas y puentes/pasarelas*, incluyendo o no tratamientos como los propuestos por Sithole y Vosselman [2006]. En el caso estudiado todas las compuertas que se podían confundir con un puente se encuentran en el sistema de diques (ver figura 5.57). En la figura 5.41 se han presentado dos de ellas. Se observa que los diques tienen taludes mientras que la pasarela/compuerta no. Además algunos impactos se han producido sobre las paredes verticales

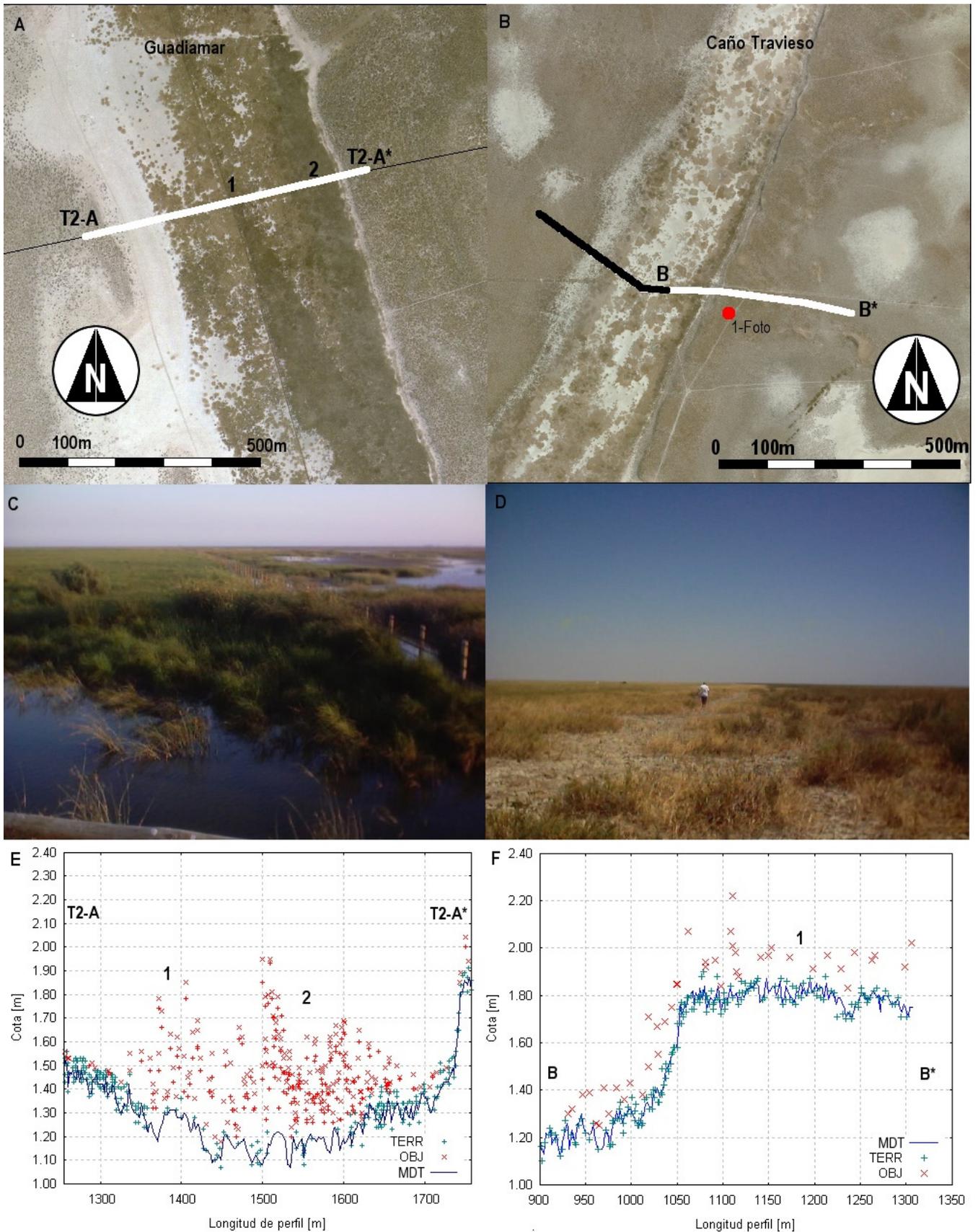


Figura 6.11. Retornos *LiDAR* sobre los dos tipos de vegetación mayoritarios en la marisma del Parque Nacional de Doñana. **A, B:** Ortogotografía de las dos áreas (A, Corte P2 de la figura 5.43; B, caño Travieso). **C:** Fotografía del Caño Guadamar con juncos, aguas arriba del corte (en el Cerrado Garrido). En T2 no se detectó agua en la ortofotografía. **D:** Fotografía de la vegetación en el margen del caño Travieso (1). **E, F:** Cortes sobre los dos tipos de vegetación (explicación en el texto).

del elemento. El proceso de detección se basaría en localizar en el sistema de diques paredes cuasi-verticales. Si el elemento cuasi-vertical detectado es paralelo a la dirección del dique, y sucede en los dos lados del dique se marca una posible pasarela/compuerta. En un último proceso de comprobación manual se deben verificar las áreas detectadas.

- Como último punto se deberían incluir las implementaciones de las *semiautomatizaciones propuestas en el siguiente epígrafe*. Éstas minimizan algunos procesos de la edición manual del MDT y la verificación de los resultados, detectando áreas conflictivas.

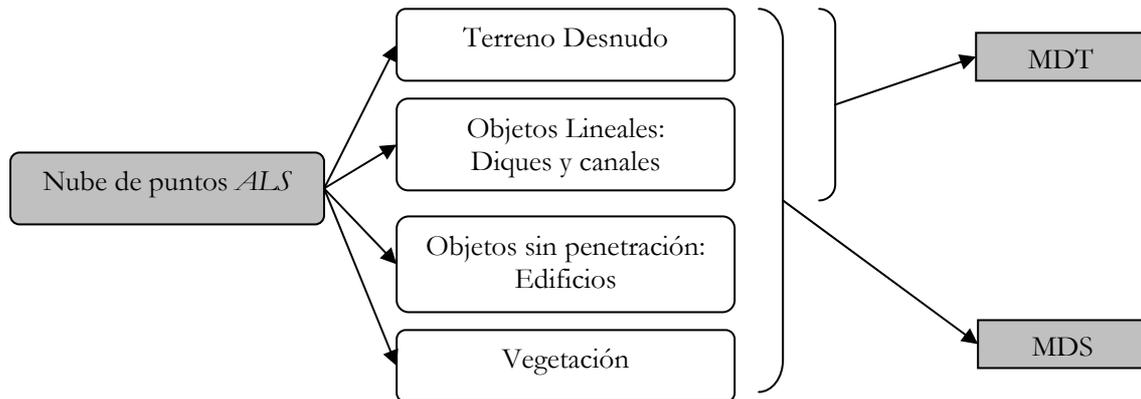


Figura 6.12. Grupos de clasificación propuestos para áreas como la marisma del Parque Nacional de Doñana y cuáles son usados para el Modelo Digital del Terreno (MDT) y el de Superficie (MDS). Explicación en el texto.

6.2.2. Otras estrategias para la mejora del MDT propuestas a partir del análisis cualitativo

Los procesos manuales son los más costosos en la generación de Modelos Digitales del Terreno. Como ya se ha mostrado hasta ahora, los mayores esfuerzos de desarrollo de la tecnología *ALS* se centran en el aumento del grado de automatización de estos procesos. El proceso de validación cualitativa realizado en el capítulo 5 ha permitido, a partir de errores detectados, proponer algunas estrategias para la mejora “automática” del MDT en levantamientos *ALS* de áreas extensas y llanas.

6.2.2.1. Detección y reparación de errores del MDT asociados a problemas *GPS/INS*

En primer lugar se ha revelado de gran importancia la detección de áreas con errores en el conjunto del sistema *GPS/INS*. En la figura 5.38 (capítulo 5) se ha comprobado que si el error se da en un área sensible como un dique su trascendencia puede ser crítica.

El error *GPS/INS* puede resultar en: pérdida o ausencia de puntos *ALS* (no hay solución para la posición y/o orientación del sensor debido a problemas o falta de observables *GPS/INS*); o bien en zonas con puntos *ALS* de precisión deficiente (posición/orientación con mayor error asociado debido a observables *GPS/INS* defectuosos). En los subepígrafes siguientes se presentan los esquemas o estrategias que se proponen para la detección semiautomática de áreas del MDT para el caso de pérdida o ausencia de puntos (subepígrafe a) o para el caso de zonas con precisión deficiente (subepígrafe b). En ambos casos el error *GPS/INS* suele producir unas zonas rectangulares con anomalías. El principio de detección se basa en la identificación de esas “zanjas” que son perpendiculares al eje de la pasada.

a) Detección de áreas con pérdida de puntos

Este subepígrafe se orienta a la detección de áreas sin puntos *ALS* por un error del conjunto de sistemas *GPS/INS*. Se propone un proceso basado en la localización de áreas sin puntos, la obtención de su contorno, y la comparación con las líneas de solape entre pasadas (figura 6.13). Se han usado técnicas de tratamiento de imágenes sobre el mapa de densidad (con el programa *IMAGEJ*; Rasband [1997-2006]). La única información necesaria para aplicar la metodología es la nube de puntos *LiDAR*. El primer proceso sobre el mapa de densidad (*ND1*, figura 6.13) tiene por objetivo obtener los límites entre pasadas. El segundo proceso (*ND2*) busca obtener los límites de los cuerpos sin puntos.

Se ha aplicado a un caso práctico de 2x2km en el Lucio del Membrillo, donde se ha localizado uno de estos artefactos. El mapa de densidades se muestra en la subfigura 6.14.A. Se ha usado un ancho de celda de 4m para asegurar que no hay espacios en áreas “sin problemas”. Se pueden apreciar claramente tres densidades en la subfigura; áreas sin puntos (3), áreas con una pasada (1) y con dos pasadas (2).

Para la extracción de las líneas de solape entre pasadas (subfigura 6.14.B) se ha aplicado en primer lugar un filtro de umbral. Se ha escogido el límite entre los valores de densidad de áreas sin solape y con solape ($ND=82$, $ND \in [0:255]$, o Densidad=4.8puntos/16m²), obteniendo la imagen *ND1*. Para completar las áreas con los errores *GPS/INS* y por tanto sin solape se ha aplicado una operación de cierre (dilatación + erosión) de 15x15px. Ésta expande y contrae las áreas en color blanco (las que tienen solape) uniendo las “cortadas”. El valor de 15px (60m) se ha escogido porque es la longitud máxima a reparar (en el sentido de vuelo). El valor de la ventana de este filtro se puede variar según el caso hasta el ancho de una pasada sin solape (180m=45px), momento en que falla el proceso ya que se juntan las áreas con solape lateralmente. En este punto se ha realizado una edición manual para reparar el tramo inferior del cuerpo que se ha denominado 1 en la subfigura 6.14.B. A continuación se ha aplicado el “análisis de partículas” (ya explicado en el epígrafe anterior). El resultado con los cuerpos numerados es el que se muestra en la subfigura 6.14.B (*ND1*”).

La identificación de los contornos de las áreas sin puntos se ha realizado siguiendo el esquema de la figura 6.13 (ND2). El umbral se ha seleccionado entre los píxeles de valor 0 y el siguiente valor en el histograma del mapa de densidad (ND=9 o Densidad=0.5puntos/16m²). El resto de procesos ya se han descrito para la imagen ND1.

El último paso es comparar las dos informaciones, contornos y líneas de solape. Las dos imágenes solapadas con el MDT como imagen de fondo se muestra en la subfigura 6.14.D. Se observa que los grupos de elementos numerados del 1 al 4 cumplen alguna de las características atribuidas a los errores del sistema *GPS/INS*: perpendiculares a las líneas de vuelo y con límites en las líneas de solape entre pasadas. En cambio los numerados como 5 y 6 no cumplen ninguno de los requisitos (se ha comprobado que se deben a masas de agua). Observándolos detenidamente se encuentran algunos entre los seleccionados que no cumplen todas las condiciones (no se acaban en las líneas de solape). Estos elementos podrían no ser identificados de forma automática con este proceso.

El proceso de detección no se ha aplicado a todo el levantamiento, pero a la vista de los resultados mostrados en la subfigura 6.14.D es posible la detección de las áreas con pérdida de puntos. Los resultados obtenidos muestran que la metodología presentada permite detectar artefactos introducidos en el MDT por errores del sistema *GPS/INS*. Estos, en áreas similares a Doñana, no son especialmente críticos excepto si afectan a un elemento como un dique (figura 5.38). Los errores del *GPS/INS* encontrados en el capítulo 5 podrían haber sido detectados con poco esfuerzo con la estrategia presentada en este apartado.

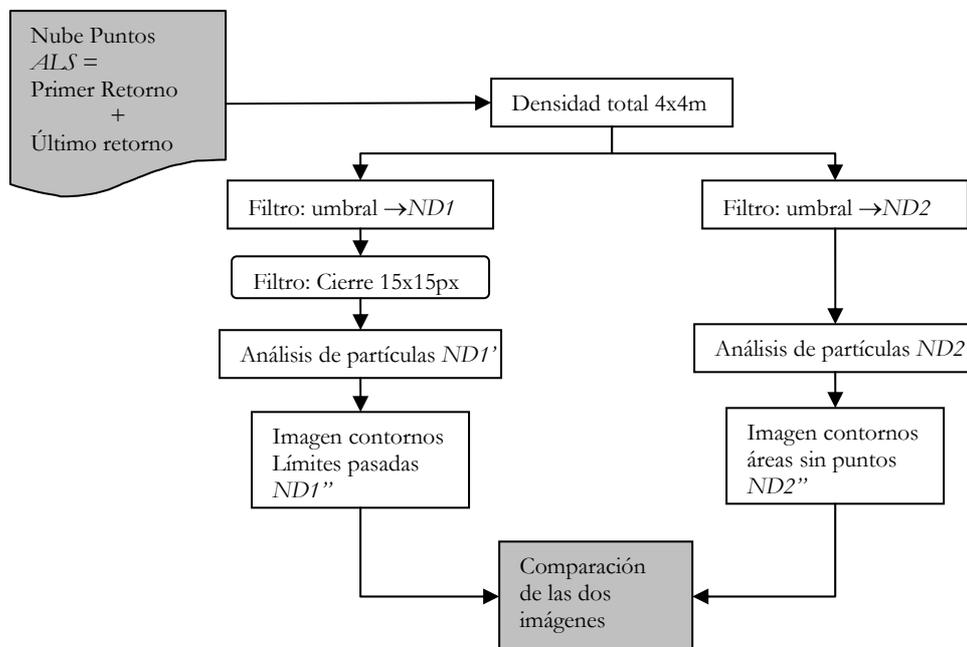


Figura 6.13 Esquema de detección de áreas con pérdidas de puntos debido a errores del sistema *GPS/INS* (explicación en el texto).

b) Detección de áreas con puntos afectados por errores relevantes del sistema *ALS*

En este caso se han introducido puntos con errores significativos en su elevación debidos a errores del conjunto de sistemas *GPS/INS*. En áreas como la marisma de Doñana aceptar puntos con errores cercanos a dos o tres veces el error altimétrico a priori (de 30 a 50cm en este caso) genera anomalías en el MDT.

Los puntos con errores se agrupan según la línea de escaneado (ver figura 2.14) y sólo afectan al MDT si están por debajo de su valor real. En el modelo aparecen artefactos con forma de “zanjas” perpendiculares a la dirección de la pasada. Algunos de los detectados ya se han presentado en el epígrafe 5.3.1.5 (figuras 5.49 y 5.50).

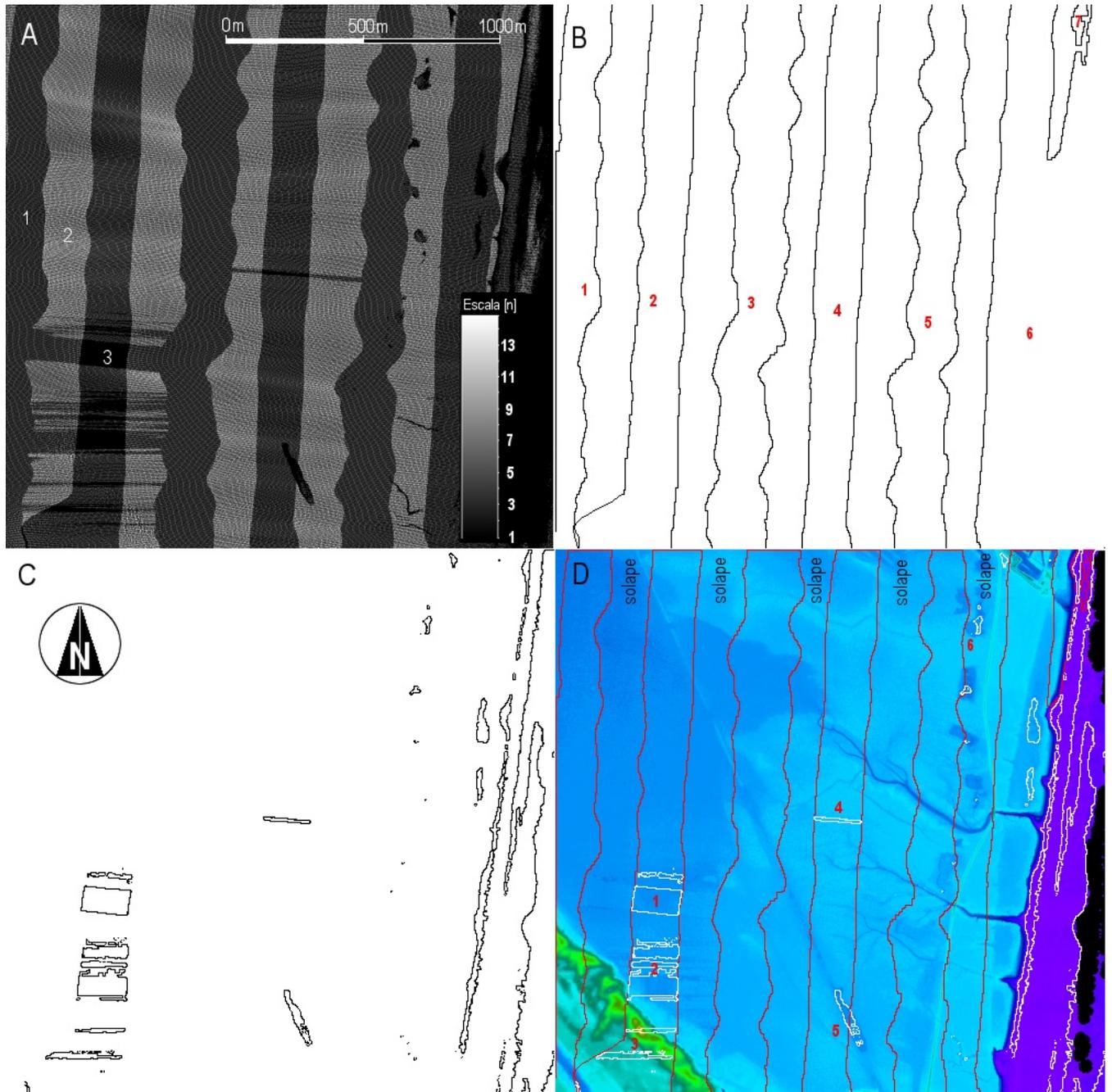


Figura 6.14. Ejemplo de aplicación del proceso de la figura 6.13 en un área con errores del sistema *LiDAR* en la parte baja del Lucio del Membrillo (Sur de la Marisma), atribuibles al conjunto de sistemas *GPS/INS*. **A:** Número de puntos *ALS* en una malla de 4x4m (el valor *N* es el número de puntos en cada celda). Se han etiquetado (1, 2 y 3) tres densidades arquetípicas del área. **B:** Resultado del proceso de obtención de los límites de las pasadas (se han numerado los centros de las pasadas). **C:** Resultado del proceso de obtención de los perímetros de las áreas sin puntos de A. **D:** Superposición de las dos imágenes (B y C) sobre el MDT original (explicación en el texto).

En los casos estudiados los errores altimétricos en los puntos *LiDAR* son del orden de 25cm, razón por la que los filtros no han actuado correctamente y se han preservado puntos erróneos. A pesar de ser sólo 25cm, en zonas llanas como la marisma del Parque Nacional de Doñana, estos elementos son apreciables a simple vista en el MDT y es preciso corregirlos aunque sólo sea por el efecto estético que suponen (figuras 5.38, 5.49, 5.50, 5.54 y el resumen en la 6.5).

Para este caso se presenta un esquema general de cálculo (figura 6.15) que se ha aplicado parcialmente en un área del Parque Nacional de Doñana (figura 6.16). Ésta contiene una pasada transversal que es la que ha presentado

errores *GPS/INS* (tanto en pérdida de puntos como en errores en las elevaciones) que generan falsos puntos bajos. El caso presentado en esta última figura es el mismo que se presentó en la figura 5.50.

Dentro del esquema planteado en la figura 6.15 se aplica, en un primer momento, una dilatación progresiva que se resta del MDT original (en este caso de 2x2m). El objetivo de este proceso, en que se obtiene “*DEMDif*”, es capturar en el modelo los elementos con alguno de sus lados de menor tamaño que los anchos de ventana usados (en este caso 6 y 10m). El modelo resultante (“*DEMDif*”) contiene sólo estos elementos aislados minimizando el efecto de la morfología del área donde se encuentran. Estos anchos deben ajustarse a las dimensiones esperables de estas “zanjas”. El proceso es efectivo si su ancho es menor al valor máximo de ventana asignado (10m en este caso). Si hay solape (como el caso analizado) estos valores son efectivos. Si no hay solape se deben elevar estos valores (ya que en general los artefactos serán de un mayor tamaño, como el caso del epígrafe anterior).

Del mapa de densidad con celdas de 4x4m se obtienen los límites entre solapes, como se ha explicado en el método por pérdida de puntos (subepígrafe a). En este caso se usan dos filtros de umbral para detectar las áreas con uno y con dos solapes. Los límites de las pasadas se presentan como líneas rojas en la figura 6.16.

El bucle que se encuentra a continuación (siguiendo la figura 6.15) es un proceso de inundación “*equicota*” (descrito en el capítulo 3 y usado en el capítulo 5). Se genera una imagen de inundación y se compara con la de las pasadas. A cada imagen de inundación (puntos inundados en blanco y no inundados en negro) se le aplican un conjunto de filtros con el objetivo de eliminar ruido (grupos aislados de puntos inundados que no interesan en el “análisis de partículas”) y suavizar ligeramente los resultados. Estos son: una media, tres dilataciones consecutivas de 3x3px y tres erosiones consecutivas. La batería de filtros consigue que las agrupaciones mayores de puntos inundados se reafirmen mientras que las de puntos aislados desaparezcan. De este modo se amplía el tamaño mínimo para detectar una posible área afectada, pero se mejora su identificación.

En este punto a cada imagen de inundación filtrada se le aplica el análisis de partículas descrito en el epígrafe anterior. Para cada una de las “partículas” detectadas se comprueban sus coincidencias con las líneas de solape. Los criterios de detección aplicables son la perpendicularidad (con un grado de tolerancia) a las líneas de solape y la contingencia dentro de tres cuerpos (el ancho de una pasada), con la excepción de la pasada transversal en que un cuerpo es todo el ancho.

En caso de detectar áreas con posibles errores se guarda el perímetro y se continúa iterando. Una vez se han detectado las posibles áreas se debe realizar una supervisión manual para localizar los puntos afectados por el error y eliminarlos. Una vez eliminados estos puntos, el recálculo del MDT permite obtener un modelo mejorado.

Para el análisis propuesto se requiere disponer, como mínimo, del MDT y de la nube de puntos *ALS* clasificada.

Como ya se ha indicado, se ha aplicado a una zona piloto donde se habían detectado errores en una pasada transversal. El hecho de tener un 100% de solape imposibilita su detección por el método del epígrafe anterior y sólo puede detectarse de forma semiautomática por el método propuesto. En la figura 6.16 se compara la imagen de inundación a cota $H=-0.16\text{m}$, a la que se han aplicado la batería de filtros, con las líneas de solape. Se ha añadido el MDT como imagen de fondo. Se han rellenado en rojo las “zanjas” detectables, y en amarillo las de muy difícil detección por que ocupan sólo un lado de la pasada o están segmentadas. En la ampliación de la figura se muestra que aún entre los detectables el criterio de coincidencia con los límites de la pasada no es aplicable (A y B figura 6.16).

Con los resultados obtenidos se ha mostrado que esta metodología es de difícil aplicación sistemática a todo el levantamiento, aunque ha sido posible detectar algunos de los artefactos existentes en la zona piloto. Aun así es útil para áreas con pasadas con un 100% de solape donde en método anterior no es aplicable. Pero en estas áreas el impacto de estos errores es menor (por ejemplo si se da en un dique disminuye algo la altura del dique, como si lo hubieran rebajado, pero no desaparece como el caso mencionado en el epígrafe anterior, figura 5.38). Por otro lado la incidencia de estos errores en áreas llanas es mínima (siempre que en un área tan extensa no afecten a un elemento como un dique). De todos modos la metodología permite detectar y eliminar esta clase de artefactos en el MDT. La mejora e implementación completa de esta metodología será fruto de futuras investigaciones.

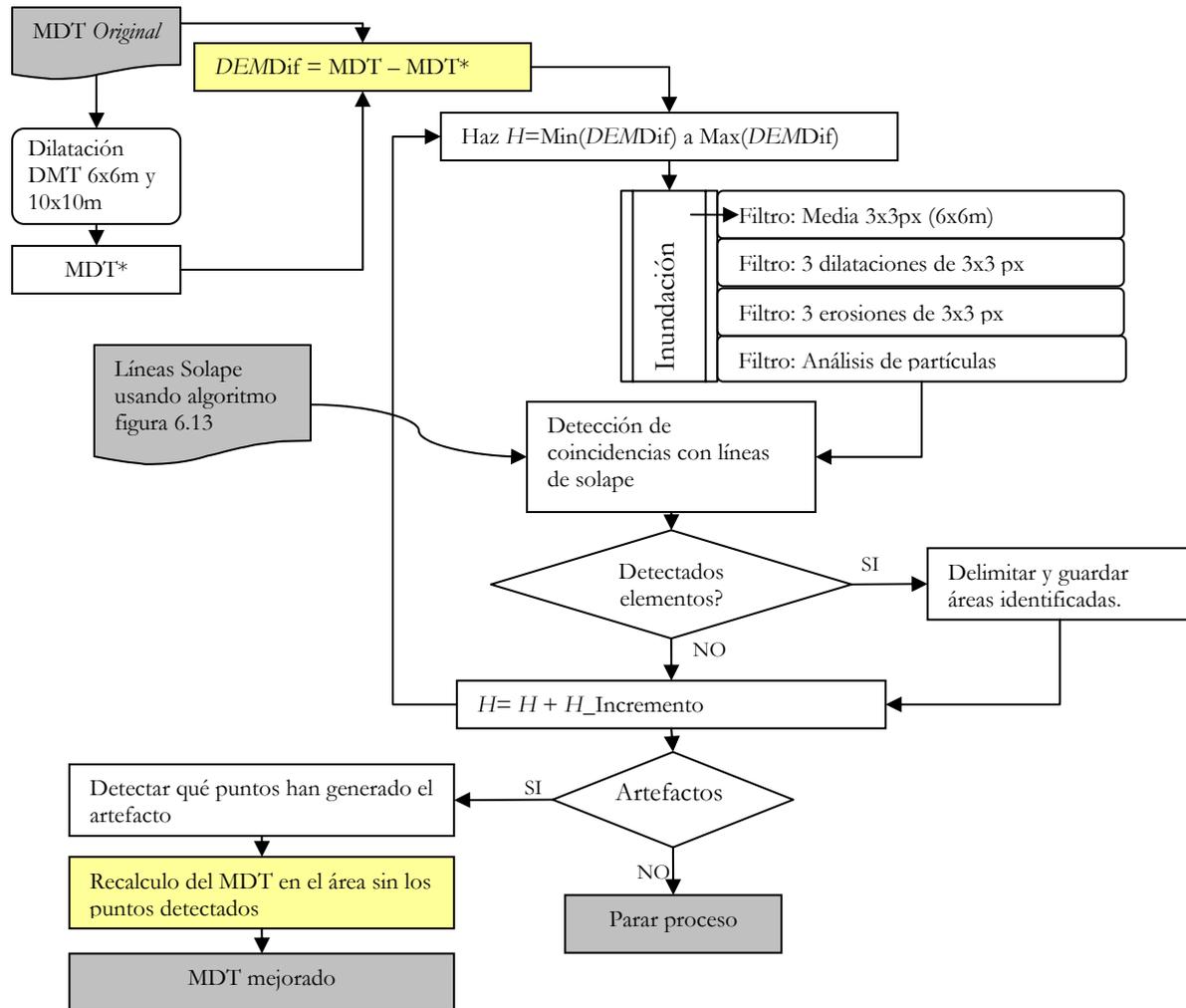


Figura 6.15 Esquema de detección de áreas con puntos con errores en su posición debidos al conjunto de sistemas *GPS/INS* (explicación en el texto).

6.2.2.2. Detección/identificación de áreas con baja representatividad del terreno

En este epígrafe, aprovechando todas las metodologías ya presentadas y la experiencia del proceso de validación, se propone una estrategia para identificar el origen de las áreas de baja representatividad. Éstas son las áreas con densidades menores al 10% de la media (sobre este valor véase la discusión en el epígrafe de densidad del capítulo 5). Para ello se propone seguir el procedimiento esquematizado en la figura 6.17.

En primer lugar se generan los mapas de densidad y penetración de los puntos láser. Estos están en función de los parámetros del filtro de clasificación de la nube de puntos usados. Las áreas con baja densidad y baja penetración pueden tener problemas de representatividad y son delimitables en ambos mapas. Las áreas con baja densidad o penetración se deben a:

- El filtro de la nube de puntos ha eliminado los puntos por ser objetos, que es el caso común.
- Hay una baja densidad debido a errores del sistema *GPS/INS* (se han eliminado los puntos en procesos anteriores al ajuste de tiras). Éste y los dos puntos siguientes son poco frecuentes.
- La baja densidad se debe a cuerpos de agua (como más clara y sin oleaje menos retornos se dan).
- Islas (áreas no cubiertas).

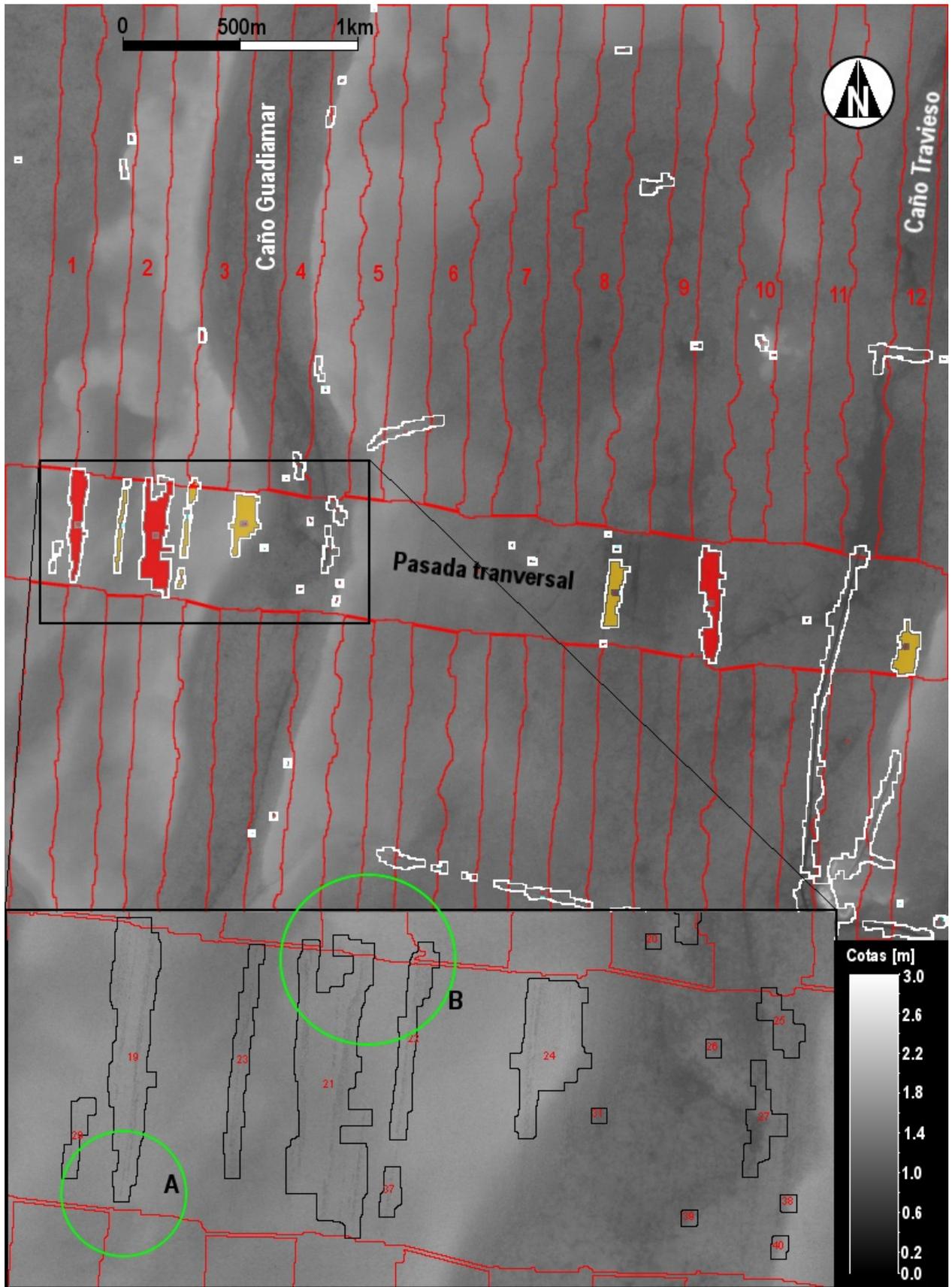


Figura 6.16. Resultados de la comparación de la figura 6.15 a cota $H=-0.16\text{m}$ para la detección de errores del sistema *LiDAR* sobre el MDT entre los caños Guadamar y Travieso. Con líneas rojas se muestran los límites de la pasada. De Este a Oeste corta una pasada transversal que es la que contiene puntos afectados por el error. En blanco el perímetro de los elementos inundados (en la ampliación en negro). Se han coloreado en rojo los errores “detectables” y en amarillo los difícilmente detectables. En círculos verdes A y B, zonas problemáticas para la detección (explicación en el texto).

En primer lugar se aplica la metodología explicada en el epígrafe 6.2.2.1.b para detectar áreas con puntos afectados por error excesivo, atribuible al conjunto de sistemas *GPS/INS*. Para su aplicación se requiere un MDT, con lo que si se incluye este primer análisis, sólo se puede aplicar en la edición del modelo.

Las áreas de baja representatividad con puntos (baja densidad y penetración) son atribuibles a la vegetación o los edificios y son directamente detectables únicamente con los mapas de densidad y penetración. En cambio las áreas sin puntos pueden ser debidas a errores del sistema *GPS/INS* en que se han perdido los puntos, a cuerpos de agua, o a islas (áreas no levantadas). Los siguientes análisis se centran en las áreas sin puntos.

Aplicando el primer método del epígrafe anterior (6.2.2.1.a) se identifican cuales de ellos se deben a errores del sistema *ALS*. Los no asignados a este error se deben, según el esquema de la figura 6.17, a cuerpos de agua o islas en el MDT. Para discriminar entre cuerpos de agua e islas se recurre a información multiespectral de calidad suficiente. En este caso se puede clasificar espectralmente la ortofotografía en dos clases (agua y no agua). Esta clasificación presenta algunas dificultades ya que las masas de agua, en función esencialmente de la salinidad (controla la actividad biológica) y de si fluye, tienen una firma espectral distinta (desde negro-verde hasta ocre).

La delimitación semiautomática de estas áreas es de utilidad para rebajar el volumen de trabajo de la inspección visual de los resultados de un Modelo Digital del Terreno e individualizar el tratamiento en cada una de ellas (en el contexto de áreas extensas y llanas como la analizada). Así en los cuerpos de agua, como ya se ha indicado en el capítulo 5 (epígrafe 5.3.1.3), además de ser delimitados se debe editar su elevación para que sea la mínima detectada en el cuerpo. Las islas en el MDT, en cambio, deben ser delimitadas, estudiada su incidencia y no incluidas en el modelo (no dejar que se generen nodos ficticios en ellas).

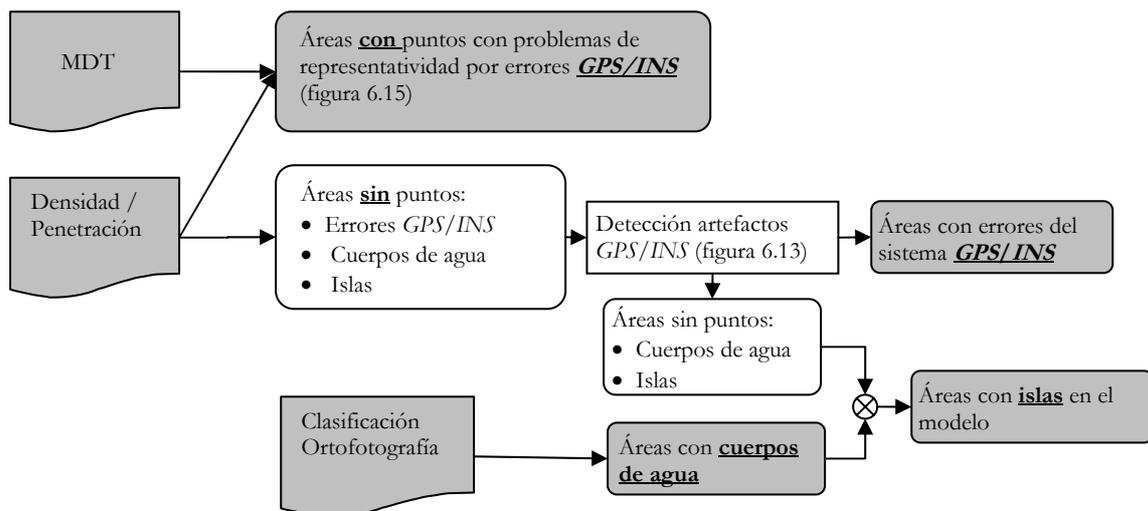


Figura 6.17 Esquema propuesto para detectar áreas con baja representatividad del terreno de forma semiautomática, identificando su origen, para áreas extensas y llanas (explicación en el texto).

Una última herramienta muy potente para mejorar la “automatización” del proceso manual de edición de un Modelo Digital del Terreno son los análisis de inundación que se han usado para la validación (epígrafe 5.3.1.a y b; figura 5.51). No se han incluido en este capítulo como un epígrafe porque ya se han desarrollado ampliamente en el capítulo 5, pero es una de las mejoras más importantes en la detección semiautomática de errores en un MDE aportada por esta tesis. La detección semiautomática de artefactos en cauces en áreas extensas y llanas ha demostrado ser básica para definir de forma correcta la red de drenaje, y una herramienta muy versátil en la verificación sistemática de un MDE.

Todo este conjunto de métodos propuestos en el epígrafe 6.2.2 son fruto de los errores observados en el MDT del caso práctico analizado en el capítulo 5. Su detección semiautomática puede ayudar a reducir el tiempo de proceso de edición manual de un Modelo Digital del Terreno a partir de datos *ALS*. La mayoría de las mejoras propuestas sólo tienen sentido en áreas extremadamente llanas como ha sido el caso estudiado; en ellas un error oculto puede ser localizado con las técnicas / estrategias presentadas.