

# Guía rápida del programa de evaluación de emplazamientos eólicos WAsP 11

Pablo Zapico Gutiérrez, Pedro García Merayo, Fernando Silván y José Alejandro Alonso de Linaje Díez

En el presente artículo se pretende proporcionar una guía rápida de funcionamiento del programa de evaluación de emplazamientos eólicos WAsP, desde la perspectiva del usuario. Facilita herramientas y procedimientos para obtener rápidamente resultados fiables.

## Antecedentes

Aunque en el mercado hay diversos programas para la evaluación del recurso eólico (como WAsP, Windpro y Windfarm), el más extendido se basa en el modelo WAsP. Con él se ha realizado, entre otros trabajos, el *Atlas eólico europeo*. Fue desarrollado por el RISO National Laboratory de Dinamarca. Hay varias versiones de este programa, algunas en Windows. Sin embargo, la que se mostró más fiable durante mucho tiempo fue la versión 5, que, a pesar de su antigüedad y de que su código fuente estaba escrito en lenguaje Fortran, era un programa de cálculo por elementos finitos eficaz aunque de difícil utilización. Esta versión no fue desbancada hasta que no se desarrolló la versión 8. A pesar de que las versiones de Windows eran (y son) más amigables y fáciles de utilizar.

Debido a esa complejidad y a que el manual explicativo del programador no aclara muchas de las pautas que es preciso seguir para obtener del programa unos resultados correctos, se realiza este artículo, que en ningún caso pretende ser un manual de instrucciones, sino solamente un complemento de él. La versión que se ha utilizado es la 11.5, que en el momento de escribir el presente trabajo es la más actual.

## Introducción

La energía eólica se conoce desde el invento de la vela para propulsar los barcos y los molinos de viento se conocen desde hace varios milenios. Sin embargo, su aprovechamiento energético para producir electricidad se desarrolló en el siglo XX. Los daneses fueron los primeros en estudiar los sistemas eólicos para producir electricidad. Actualmente, se realizan estudios de viento con mediciones y cálculos de las producciones eólicas

cas en función de los registros y de las características del terreno.

Antes de continuar, cabe la pregunta, ¿qué hace el WAsP? Es un programa que entrega dos resultados fundamentales. El primero es un mapa de producciones eólicas de la zona de estudio superpuesto al mapa topográfico, a escala y con coordenadas UTM. El segundo es una tabla de producciones de las máquinas que se hayan situadas sobre el mapa topográfico. Además, puede analizar los datos y realizar informes, las distancias interturbinas, la densidad de potencia, la velocidad media, la producción, etc.

Para empezar tiene que haber unos datos de partida en el emplazamiento, que son los de medición de velocidad y dirección del viento, correlativos cada 10 minutos, así como las coordenadas UTM del punto donde se ha efectuado la medición. Se precisa, además, un modelo digital del terreno en forma de mapa con un formato concreto. Hay que conocer la rugosidad del terreno, así como la curva de potencia y empuje del aerogenerador con el que se va a calcular. El programa se basa en la introducción de unos valores de mediciones meteorológicas tomados en un punto concreto, de los obstáculos existentes, de la rugosidad, de la topografía en tres dimensiones introducida como modelo digital del terreno, de la situación del punto de medición, de las características de la máquina elegida y de su altura de buje. A partir de estos datos el programa WAsP calcula el potencial eólico de una zona concreta, para un aerogenerador determinado y para unas ubicaciones concretas, si se le proporcionan.

Para hacer todas estas operaciones no se utiliza un programa, sino dos, primero el WAsP entrega una matriz de

resultados numéricos grabada en un archivo con un formato determinado. El WAsP proporciona unos resultados numéricos correctos, pero en cuanto a su presentación gráfica deja bastante que desear. Dicha matriz no es un mapa, ni se puede trabajar en él. Para conjugar esos resultados con el modelo digital del terreno se puede utilizar posteriormente el programa Winsurf o Surfer, que es un GIS que admite también la introducción de datos de forma numérica. De este programa se va a obtener un mapa de producciones con una escala de colores personalizada por el usuario y superpuesta a la topografía del terreno, también se pueden situar y numerar las máquinas sobre los cálculos anteriores. El Surfer convertirá la matriz de resultados numéricos, que ha entregado el WAsP, en un mapa de producciones superpuesto a un plano a escala.

Posteriormente, se vuelve al WAsP y se hace un nuevo cálculo para evaluar la producción de una serie de aerogeneradores situados en unas coordenadas determinadas sobre el terreno. Se vuelve a obtener una tabla de valores numéricos en forma de archivo; son las producciones para los 12 sectores en que se divide convencionalmente la rosa de los vientos (a veces se utilizan 16 sectores). Se tiene en cuenta en ese cálculo la altitud sobre el nivel del mar, con la correspondiente disminución de la densidad del aire y, por ende, de producción y los solapamientos o sombras entre las diferentes estelas de las máquinas contiguas para las 12 direcciones en que se divide normalmente, por convención, la rosa de los vientos. Estos parámetros también afectan a la producción. El conjunto de estos programas es lo que vulgarmente se denomina WAsP, aunque, como se ha visto, son programa-

mas que dependen unos de otros para poder conseguir unos resultados finales presentables e interpretables.

Se debe de tener presente que el programa WAsP, pese a su prestigio y extendido uso, tiene limitaciones en terrenos de orografía compleja. No es tan problemático el aspecto de la rugosidad. En el caso de que la superficie y la vegetación no sean relativamente uniformes, se puede configurar un mapa de rugosidad específico para el emplazamiento concreto que lo precise. En cuanto a la orografía, el error de cálculo aumenta cuanto mayor sea la distancia entre el aerogenerador en cuestión y la posición de la torre de medición utilizada para el cálculo. A partir de unos seis kilómetros de distancia al punto de toma de datos, el nivel de incertidumbre suele ser elevado ( $\pm 20\%$ ), aunque depende de la orografía.

En el presente artículo se pretende iniciar al lector en el trabajo con el programa WAsP versión 11.5 para evaluación de emplazamientos eólicos.

### Sistema operativo

El programa WAsP 11 funciona con el sistema operativo Windows, aprovechando su facilidad de utilización y la mejor gestión de los recursos.

### Símbolos y formatos utilizados

Los símbolos utilizados en el texto que sigue a continuación son:



Tecla de intro.



Clic del ratón (botón izquierdo).



Tecla representada en el interior del cuadro.

*En cursiva* Nombre de tecla o campo.

Continuamente se debe tener en cuenta el botón derecho o alternativo del ratón, pues dará acceso a aplicaciones, introducción de datos, salida de resultados, etc.

Los diferentes archivos que se generarán deberán tener y una extensión determinada para que el programa los reconozca. Se pueden ver en la tabla 1. Muchos de ellos son simples archivos de texto, pero la extensión hace que sean reconocidos por el programa WAsP.

Los pasos que es necesario seguir para el funcionamiento correcto del programa se exponen a continuación de forma secuencial.

Nombre o tipo de archivo	Extensión		
	Principal	Secundaria	Antigua
Archivo de WAsP	wmh	-	wwk
Proyecto de WAsP	wph	-	wpr
Estación meteorológica	wsg	txt	wms
Observed wind climate	owc	tab	-
Mapa	map	-	bna
Rosa de rugosidad	wrr	rrd	rds
Obstáculos	wog	obs	-
Ubicación de aerogenerador	wsg	txt	wts
Curva aerogenerador	wtg	pow	trb
Conjunto de aerogeneradores	wwf	-	-
Resource grid	wwr	wrg	rsf; grd

Tabla 1. Extensiones de archivos admitidos por WAsP.

### Preparación de la base de datos de mediciones y obtención del archivo de medidas

Se deben introducir en el modelo los datos meteorológicos grabados en la estación meteorológica de medición en el formato requerido por el programa (archivos \*.OVC o \*.TAB) tras haber filtrado las mediciones erróneas.

La versión 11 de Windows (en la versión 8 ya existía) cuenta con una utilidad que permite preparar los ficheros con facilidad, pero previamente hay que haberlos revisado y eliminado los datos espurios, erróneos y dudosos.

Se parte de un listado de archivos \*.POW o \*.WND (uno diario). En cada uno de ellos se guardan los siguientes datos:

Fecha Dirección Velocidad

El formato se lee como un archivo de texto con extensión \*.TXT. Estos archivos se importan desde Excel como "texto separado por espacios".

Una vez abierto con Excel, se guarda en un libro de hojas de cálculo. Se van abriendo más archivos y copiando en la misma hoja de cálculo. El límite está en las 65.536 filas máximo que admite Excel por hoja de cálculo. Se recuerda que un año se compone de 52.560 medidas, que ocuparán otras tantas filas, por lo que se aconseja utilizar tantas hojas de cálculo como años de mediciones haya. Como se utiliza el formato de un libro de

Excel, si se tienen más datos, se abre otra(s) hoja(s) de cálculo en el mismo libro. Una vez terminado el proceso de lectura y conversión de datos, se aconseja dejar los datos originales como están y copiarlos en otras hojas para trabajar con ellos, modificarlos, depurarlos, etc. (utilizar la función =Hoja1!A1, sustituyendo lógicamente la denominación de hoja y celda por la que proceda, así como la función rellenar). Incluso si los datos los entrega el *data logger* en una unidad diferente a la que se va a utilizar, se puede operar con ellos y convertirlos sin perder los datos originales. Es el momento de reemplazar el punto de separación entre enteros y decimales por una coma, para que Excel reconozca el número como tal y no como texto. Posteriormente y en función de las temperaturas (si están registradas), y de las fechas y las horas, se procederá a analizar los datos para detectar anemómetros y veletas "clavados" por el hielo y/o averías. En caso de que un anemómetro esté averiado, hay que calcular el valor de  $\alpha$  en la ecuación (1).

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\alpha \quad (1)$$

Donde:

$H_1$  = altura del anemómetro 1 (m).

$H_2$  = altura del anemómetro 2 (m).

$V_1$  = velocidad del anemómetro 1 (m/s).

$V_2$  = velocidad del anemómetro 2 (m/s).

También se puede tantear el valor de  $\alpha$  mediante la igualdad (2).

$$\alpha = \left(\frac{z_0}{10}\right)^{0,2} (1 - 0,55 \log(V_r)) \quad (2)$$

O también aplicando (3):

$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{15,25}{z_0}\right)} \quad (3)$$

Donde:

$z_0$  = rugosidad superficial (m).

$V_r$  = velocidad del viento a la altura r (m/seg).

De esta manera, se comprueba que el valor de  $\alpha$  obtenido se ajusta a la realidad del punto de la toma de datos. Se suelen utilizar los dos métodos de forma paralela. Por un lado, se calcula el valor de  $\alpha$  en función de los datos existentes (ecuación [1]) y, por otro, se utilizan las igualdades (2) y (3) para comprobar los resultados. Posteriormente, se recalculan los datos que falten a la altura del otro anemómetro. Si los dos anemómetros están parados, se desprecia el o los datos afectados. De nada sirve un dato de dirección del viento si no va acompañado del valor de la velocidad en ese momento. Lo mismo ocurre si lo que falta es la dirección, el dato de velocidad sin dirección no es útil. Una vez que se han revisado los datos y se ha operado con ellos, en otra hoja de cálculo del mismo libro, se colocan tres columnas (utilizando =Hoja1!A1, como anteriormente), se arrastra hacia abajo y se rellena hasta cubrir el total de los datos (hacer Edición ↓ Rellenar ↓ Hacía abajo ↓); si se han seleccionado celdas de más, se eliminan posteriormente los campos con valor 0. La hoja se puede guardar en formato \*.PRN (texto separado por espacios) o \*.TXT, aunque todavía no se puede utilizar en el programa WAsP como está.

En el módulo denominado OWC Wizard del programa WAsP se pueden introducir datos desde archivos con formato \*.PRN o \*.TXT e incluso añadir más. La primera pantalla (figura 1) permite incluir las coordenadas geográficas de la torre de medición y a partir de la siguiente se selecciona el origen de los datos. Al terminar, el archivo final o resultado, se guarda con formato \*.TAB que es compatible directamente con el WAsP. Una vez abierto un árbol y situados sobre el atlas de viento (Wind atlas) y la torre meteorol-

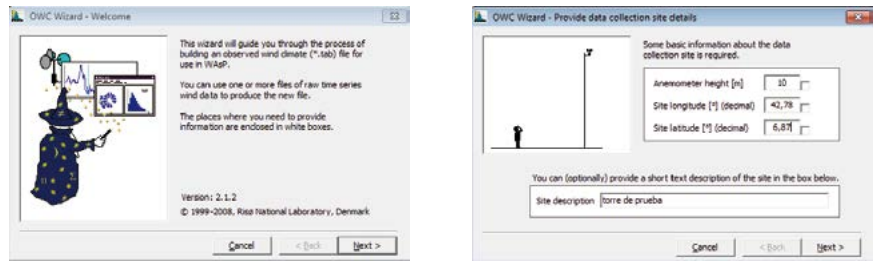


Figura 1. Ventana izquierda. Pantalla de entrada al Observed Wind Climate (OWC). Ventana derecha. Primera pantalla donde se introduce la altura de medida del anemómetro y las coordenadas geográficas de la torre.

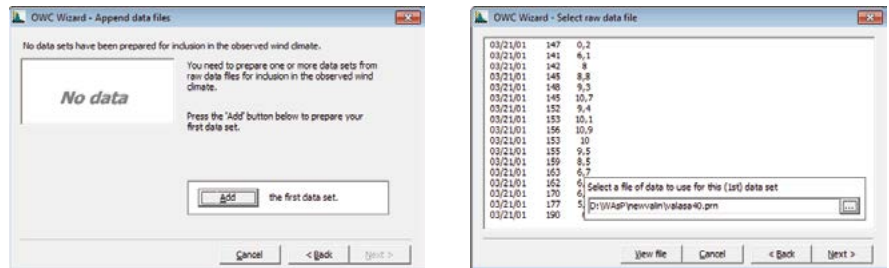


Figura 2. Ventana izquierda. Pantalla en la que se añade un nuevo archivo de datos. Pantalla derecha. Archivo de datos leído.

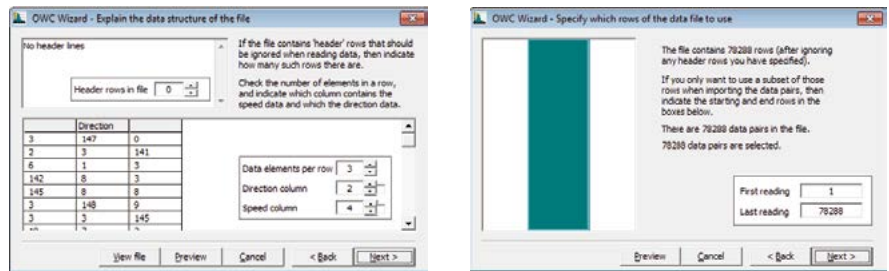


Figura 3. Ventana izquierda. Pantalla en la que se interpreta el archivo leído, se observa que no se han interpretado bien los datos (el programa utiliza notación americana, puntos para separar los decimales en lugar de comas). Pantalla derecha. Final de la lectura de datos de un archivo.

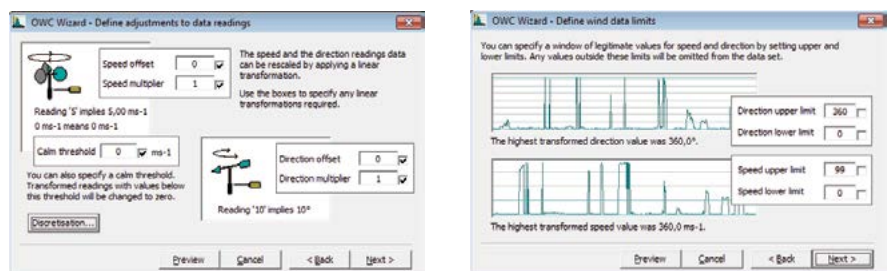


Figura 4. Ventana izquierda. Pantalla en la que se introducen los datos de calibración del anemómetro y los offsets. Pantalla derecha. Límites de los datos de viento.

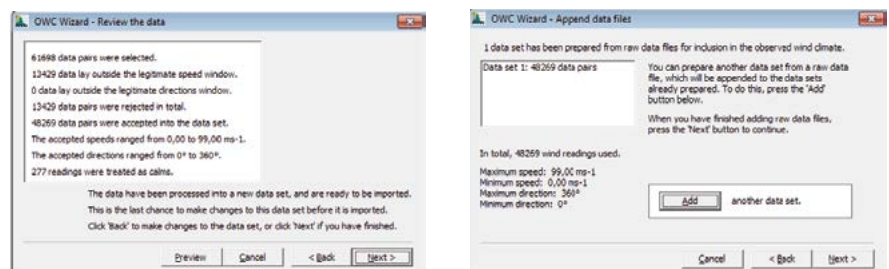


Figura 5. Ventana izquierda. Pantalla de resumen de datos. Ventana derecha. Donde ofrece la posibilidad de introducir más series de datos.

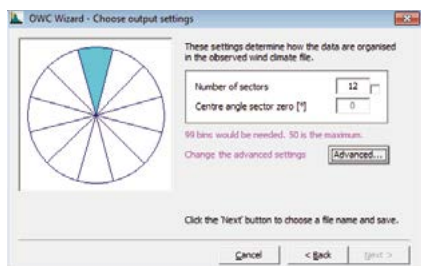


Figura 6. Pantalla en la que se puede modificar la rosa de los vientos.

lógica (*Met station*) con el botón derecho de ratón se selecciona *Insert from file* y se elige *Observed wind climate*. Posteriormente, se indica la ubicación del archivo origen de los datos (se pueden añadir mas archivos). Con esta secuencia se habrán importado los datos meteorológicos en el registro del programa. A continuación, se graba el fichero resultante y se pasa al siguiente punto (Figs. 1-6).

### Preparar el modelo digital del terreno en formato \*.MAP

Para ello, se parte de un archivo con curvas de nivel en tres dimensiones de Autocad con formato \*.DWG, se seleccionan todas las capas y se ocultan. A continuación, se dejan visibles exclusivamente las capas con las curvas de nivel y se graba el plano en formato \*.DXF de Autocad 2000 o 2004. Este fichero ya es casi compatible con WAsP, aunque todavía es un conjunto de curvas de nivel con cota, que no forman una única polilínea con cota y que puede producir errores en el cálculo. Para facilitar la tarea de convertir los mapas, el programa WAsP tiene una utilidad llamada WAsP Map Editor. Este programa lee el formato \*.DXF (entre otros) y lo convierte en otro (\*.MAP), reconocible por el WAsP. Además une las curvas de nivel y ayuda mucho a depurar el plano. Desde el editor de mapas del WAsP se abre el archivo \*.DXF (Figs. 7-10).

Una vez abierto el archivo se puede trabajar con él, eliminar líneas, unir curvas de nivel, modificar rugosidades, etc.

En el momento en que se ha obtenido el mapa y después de haber operado con él, para grabarlo se elige el formato \*.MAP, que es el que utiliza WAsP. Se trata de un formato en el que la cartografía en tres dimensiones ocupa muy poco espacio, por lo que es fácil de manejar. Una vez grabado el mapa en formato \*.MAP o ASCII, ya está preparado para

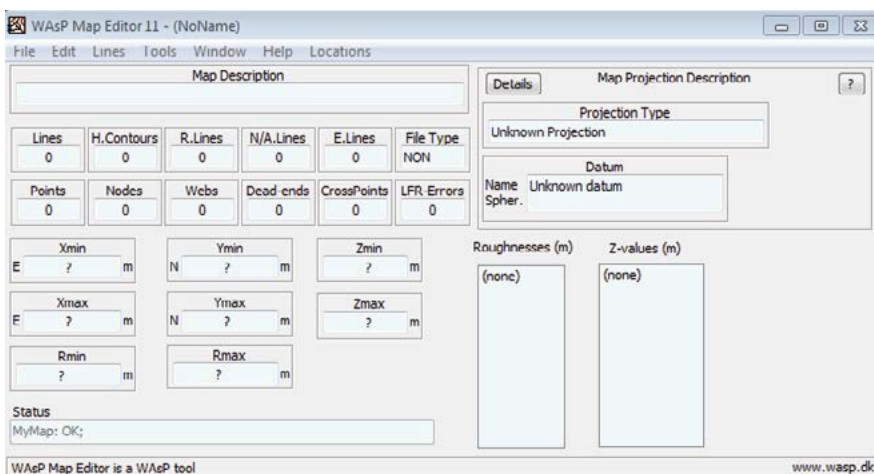


Figura 7. Pantalla principal del editor de mapas del WAsP.

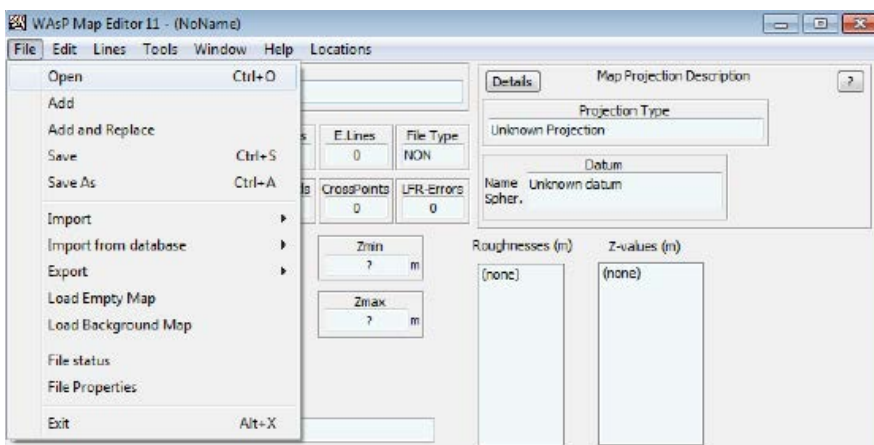


Figura 8. Ventana desplegable del editor de mapas del WAsP.

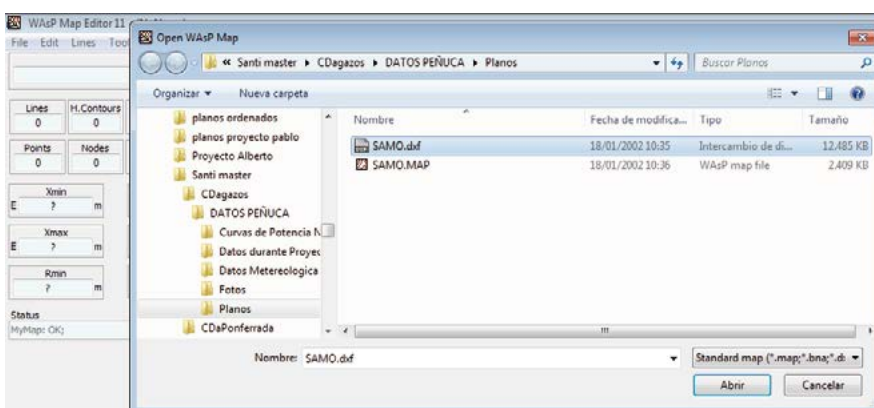


Figura 9. Ventana de apertura de archivos del WAsP.

utilizarlo con WAsP. Si está bien “depurado”, ocupará unos cientos de Kb, o como mucho unos Mb si es muy grande. El formato \*.MAP lo leen los programas Autocad Map, ArcGis y ArcView, entre otros, y lo utilizan algunos navegadores. Esto ha facilitado muchísimo el trabajo con cartografía, las versiones bajo DOS eran muy “repugnantes” con los mapas

y en el momento en que dos curvas de nivel no estaban unidas aparecía una línea extraña, no aceptaban el archivo o lo consideraban erróneo. La conversión de formatos para poder introducirlos en el WAsP era quizá el mayor problema que daban las versiones antiguas. Actualmente, esto es mucho más sencillo pues ha mejorado considerablemente. Hubo

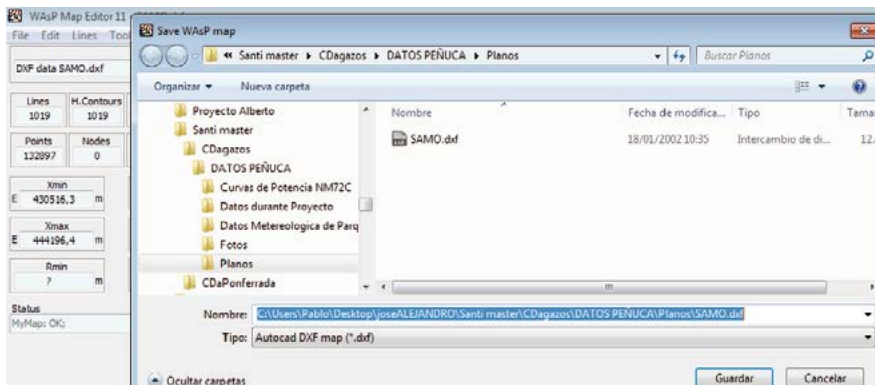


Figura 10. Ventana de grabado del modelo digital del terreno del editor de mapas del WASP.

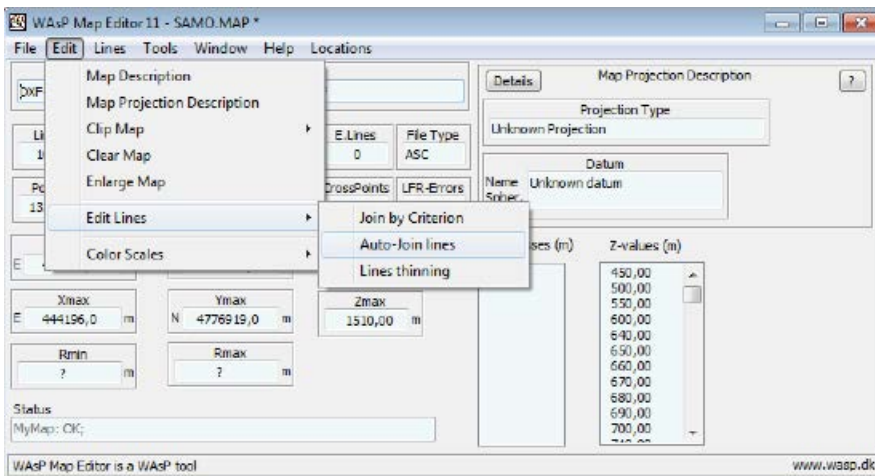


Figura 11. Ventana con la unión de líneas.

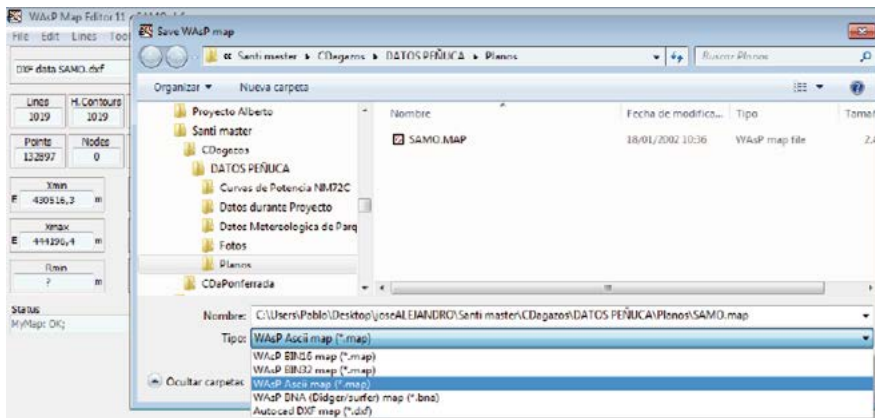


Figura 12. Ventana de grabación y selección de formato del editor de mapas del WASP.

un programa bajo el sistema operativo DOS, llamado DXFtoMAP, que ayudaba en la conversión, pero previamente había que convertir cada curva de nivel en una única polilínea manualmente o con Autocad Map. Actualmente, el WASP Map Editor convierte las curvas de nivel interrumpidas, por ejemplo por la unión de dos o más hojas, en una polilínea única y depura el archivo. Si el plano es grande o se compone de la suma de

varias hojas, esta operación puede demorarse algunas horas, en función de la cantidad de curvas de nivel que haya y de la velocidad del ordenador que se utilice (Figs. 11 y 12).

### Curva del aerogenerador

Se puede obtener el archivo con formato \*.WTG e insertarlo directamente en el WASP, o se puede crear una curva en función de la densidad del aire en el em-

plazamiento y de las curvas de potencia y empuje proporcionadas por el fabricante en papel o en formato \*.PDF (Fig. 13).

Hay una utilidad del WASP denominada *Wasp turbine editor*, que permite editar los archivos de las turbinas eólicas para consultarlos o modificarlos. Si se activa la casilla denominada *Enable edit*, se pueden cambiar los valores de las diferentes casillas y, posteriormente, con la utilidad *File* → *Save as* grabarla en la ubicación y con el nombre que se desee. Antes de dar por finalizado el nuevo archivo, se debe desactivar la posibilidad de modificarlo en la misma casilla *Enable edit*. De esta forma, queda protegido contra modificaciones o errores imprevistos. Ello permite introducir máquinas nuevas o modificar curvas de otras existentes, principalmente para adaptarlas a la densidad del aire en el punto de utilización.

### Preparar el mapa de rugosidad y su archivo correspondiente

En función del tipo de terreno circundante, hay que preparar un mapa de rugosidad. El valor de la rugosidad se toma de las tablas indicativas que se incluyen en las instrucciones del propio programa y/o en los manuales sobre energía eólica. Se puede dibujar en coordenadas polares un mapa de diferentes niveles de rugosidad según las zonas y guardarlo para otros cálculos. El mapa de rugosidad, aunque se guarde en un archivo independiente, va incluido en el archivo principal \*.WMH y es función de la topografía del terreno y de su recubrimiento. Si no se incluye ninguno, el programa crea uno con una longitud de rugosidad uniforme igual a 0,03.

Respecto a las clases de rugosidad y longitudes de rugosidad, el *Atlas eólico europeo* define clase de rugosidad a partir de la longitud de rugosidad medida en metros,  $z_0$ , es decir, la altura sobre el nivel del suelo donde la velocidad del viento es teóricamente cero,  $\ln$  es la función logaritmo neperiano (o natural). El cálculo lo realiza según las ecuaciones (4) y (5).

$$\text{Si la longitud de rugosidad} \leq 0,03 \rightarrow \text{clase} = 1,699823015 + \ln(\text{longitud})/\ln(150) \quad (4)$$

$$\text{Si la longitud de rugosidad} > 0,03 \rightarrow \text{clase} = 3,912489289 + \ln(\text{longitud})/\ln(3,3333333) \quad (5)$$

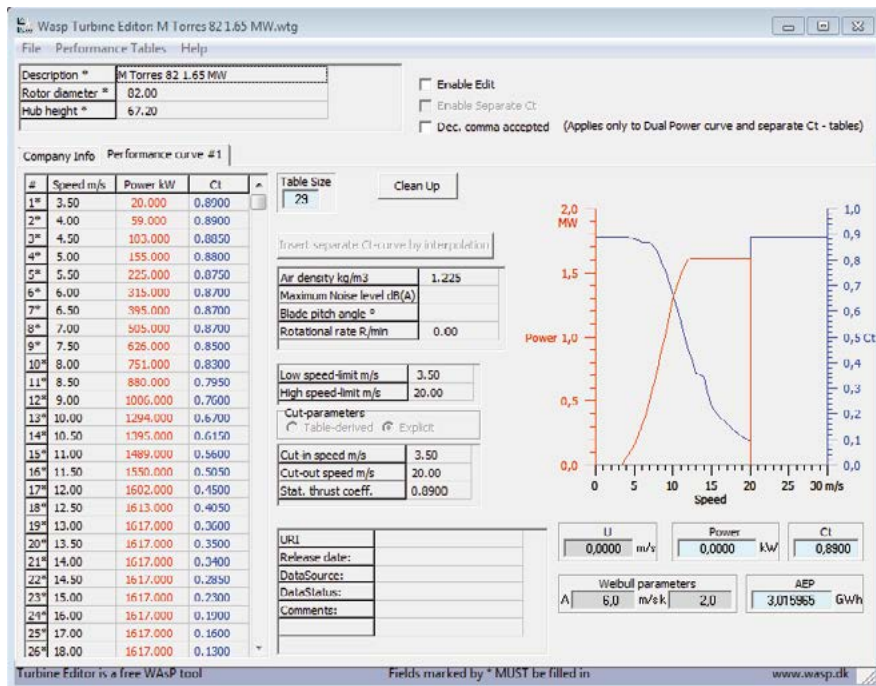


Figura 13. Ejemplo de archivo de un aerogenerador.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad z0 (m)	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p. ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Solo colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1.250 m
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Nota: Estas definiciones se han tomado del *Atlas eólico europeo*.

Tabla 1. Clases y de longitudes de rugosidad.

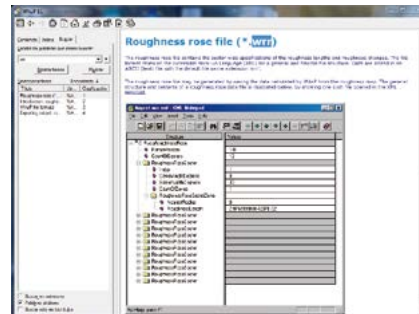


Figura 14. Vista de un archivo de rugosidad.

El archivo permite crear una rosa de rugosidad diferenciada en 12 sectores y para distintas distancias, con lo que se pueden simular macizos boscosos localizados, etc. Si fuera preciso se puede añadir un archivo específico con los obstáculos existentes en la zona. Mediante el botón derecho del ratón se elige si se inserta el archivo de obstáculos directamente o desde un archivo con formato \*.WOG o \*.OBS. El fichero se puede editar y cambiar haciendo ↓ sobre él en el árbol desde el WAsP. En las últimas versiones se puede importar también en formato *shape* desde el programa ARCVIEW. Las versiones antiguas permitían crear un archivo de rugosidad independiente. La actual lo asocia al archivo de topografía (Fig. 14).

### Montaje del árbol de Wasp 11

El árbol del WAsP se introduce a partir de un nuevo proyecto, en el que se van añadiendo el aerogenerador, el atlas y dentro de él se inserta el archivo \*.TAB con los datos meteorológicos y el archivo de rugosidad en formato \*.WRR. A continuación, se inserta el archivo con el modelo digital del terreno en formato \*.MAP y ya se puede crear un mapa de producciones denominado *Resource grid* y calcularlo. Entonces, se crea un archivo denominado *Wind farm* o parque eólico, que contendrá las posiciones de los aerogeneradores. Desde el directorio raíz se utiliza el botón derecho y la utilidad *Insert new* o *Insert from file* que permiten ir conformando el árbol del nuevo archivo de cálculo paso a paso (Figs. 15 y 16).

Una vez montado el árbol, realizados los cálculos y guardado el archivo, se puede sustituir una torre de medición por otra (el WAsP no puede calcular con datos de más de una torre de medición a la vez). Se puede cambiar el mapa o modelo digital del terreno. Se pueden añadir más conjuntos de aerogenerado-

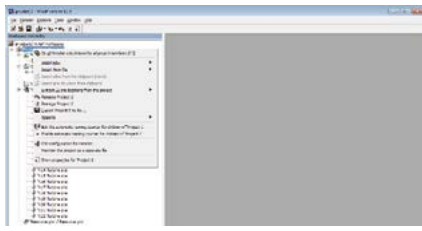


Figura 15. Árbol de WAsP con la ventana desplegada mediante el botón derecho del ratón.

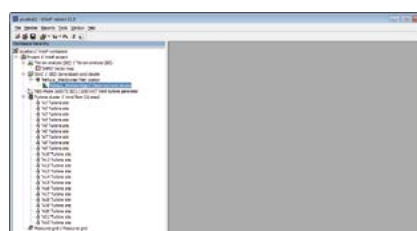


Figura 16. Árbol de WAsP con el archivo de datos meteorológicos resaltado.

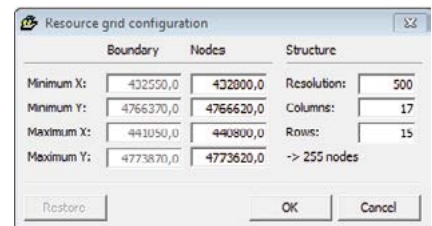


Figura 17. Ventana de ajuste del cálculo del mapa de vientos o producciones.

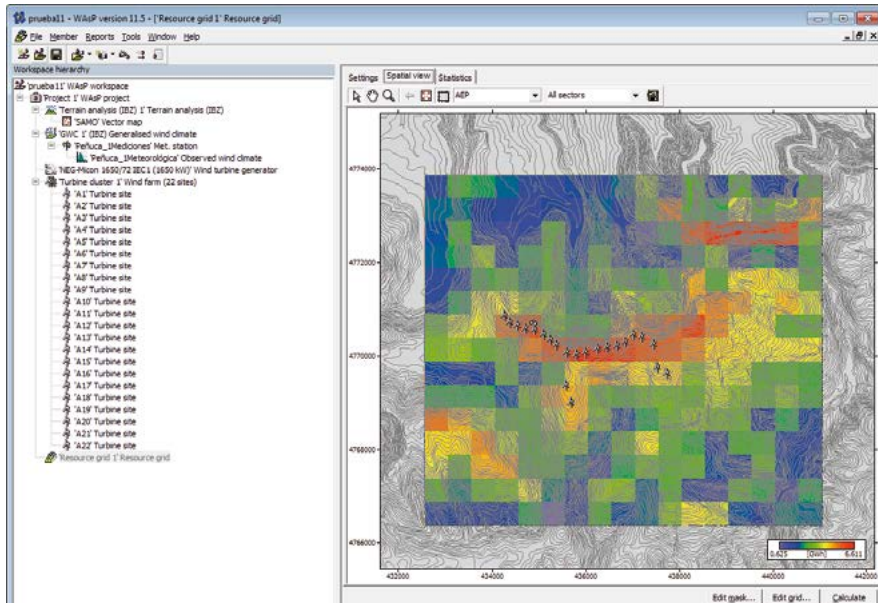


Figura 18. Mapa de producciones. Se ha utilizado una cuadrícula de 500\*500 metros para que la aprecie bien el lector. El cálculo real deberá realizarse con una resolución mucho mayor ( $\pm 10^*10$  m).

res o parques eólicos. Se pueden añadir y/o eliminar parques eólicos, exportar archivos de datos, etc. Todo ello se hace situando el puntero del ratón y haciendo  $\downarrow$  sobre el botón derecho para que despliegue la ventana de posibilidades factibles en cada tipo de archivo. Naturalmente, después hay que recalculer el atlas de viento, las ubicaciones de las máquinas y el mapa de vientos o producciones (*resource grid*) y grabar con el nombre antiguo, perdiendo el archivo original, o con otro de nueva elección, así como definir la ruta de acceso correspondiente. Conviene ser muy ordenado con esto, para poder diferenciar los diferentes tanteos, unos de otros, pues se realizan muchos.

En el caso de que sobre el mismo árbol de WAsP se calculen varios parques eólicos, se puede hacer con un aerogenerador distinto para cada parque. Se crean los distintos archivos para cada parque eólico y se introducen las máquinas, se copia en la carpeta la curva de la máquina con la que se pretende calcular y se procede a ejecutar el programa.

### Calcular el mapa de vientos

Haciendo  $\downarrow$  sobre el icono denominado *Resource grid* se abre una ventana a la derecha. En dicha ventana se selecciona la pestaña *Settings*, que al desplegarse permite elegir la altura de cálculo del mapa de vientos o producciones. Si en un momento determinado se quisiera *engañar* al WAsP para que no corrija los datos de viento en función de la altura, solo hay que decirle que los datos meteorológicos se han tomado a la altura que más convenga, manteniéndose, obviamente, siempre del lado de una conservadora seguridad. En la pestaña *Spatial view* se ajusta el parámetro que se quiere calcular, normalmente es AEP (producción anual) y en la parte inferior de la misma haciendo  $\downarrow$  sobre *Edit grid* se ajusta el área de cálculo del mapa de vientos o de producciones y el tamaño de la cuadrícula (Fig. 17). Si se elige un tamaño de cuadro grande como el de la figura 18, que es de 500\*500 metros, será muy poco útil, pero el cálculo se efectuará muy rápido. Si se elige un tamaño muy pequeño como 10\*10 metros (mucho más útil), la

operativa se demorará, a veces incluso días enteros. Terminados estos ajustes se hace  $\downarrow$  sobre el botón *Calculate* y cuando el ordenador acaba se graba el archivo de WAsP con el cálculo incorporado a él. La ventaja que presenta es que una vez introducidos todos los datos, se guardan en un único archivo, a veces muy grande, pero que hace muy cómodo su manejo.

WAsP utiliza un perfil logarítmico de variación de la velocidad del viento con la altura y establece un equilibrio entre las fuerzas de presión, de Coriolis y de fricción que lleva a la denominada ley de arrastre geostrofico que relaciona las velocidades geostrofica y de fricción. Conocidas las características de rugosidad y orografía del punto de medida y con el valor de dirección y velocidad del viento  $V$  medido a una determinada altura  $h$ , WAsP calcula la velocidad de arrastre  $V^*$  y, a partir de esta, la velocidad geostrofica  $V_g$  y su dirección. Esta forma de calcular normalmente será útil, pero en un momento determinado puede que se desee anularla, como se ha descrito.

La mayor ventaja de la versión de Windows es que una vez montado el archivo, es muy fácil repetir el cálculo o modificarlo a voluntad en muy poco tiempo y con poco esfuerzo. Con la versión 5 había que introducir todos los datos con sus rutas de acceso en DOS cada vez que se quería hacer un tanteo.

### Situar las máquinas

Dentro del archivo de nominado *NOMBRE Wind farm*, se puede actuar de dos formas. Una es introducir manualmente cada máquina y la otra es introducir un listado de aerogeneradores desde un archivo, aprovechando la utilidad denominada *Insert from file* del WAsP. Para crear el archivo con las posiciones de los aerogeneradores, lo más cómodo es utilizar una hoja de cálculo. En la primera columna se introducen las coordenadas X y en la segunda las Y, se graba y se exporta como "texto separado por espacios" (formato \*.PRN). Luego se abre

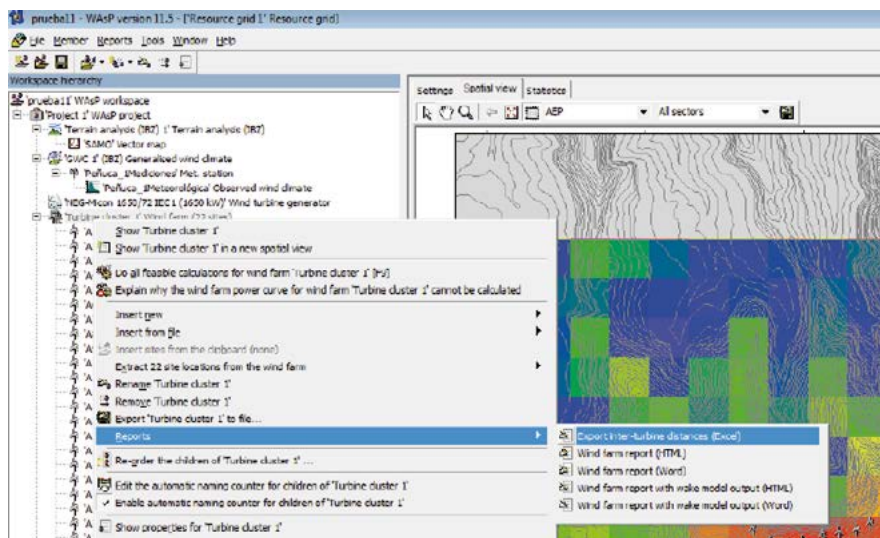



Figura 19. Procedimiento para obtener la tabla de distancias entre turbinas.

con el bloc de notas de Windows y se graba "tal cual" en formato \*.TXT. Este archivo ya se puede insertar en el WAsP por el método explicitado. Posteriormente, se abre el plano y se pueden ir seleccionando las máquinas con el ratón, una a una, y cambiándolas de posición. Antes de grabar, se selecciona la carpeta del parque eólico con el puntero del ratón y haciendo ↓ en el botón derecho se pide al programa que calcule las ubicaciones. Automáticamente desaparecen los triángulos con el fondo amarillo que había junto a cada máquina y que siempre indican que no se ha efectuado el cálculo. A continuación, se graba el trabajo para no perderlo. Para conseguir el listado final de las ubicaciones de los aerogeneradores se pincha con el ratón sobre el archivo que contiene sus posiciones y con el botón derecho se elige la opción deseada. Se puede copiar al portapapeles o exportar a un archivo.

Los efectos de estela entre máquinas se calculan únicamente entre los aerogeneradores que se encuentran dentro del mismo *Wind farm*. Si se crean varios, el programa WAsP no calculará los efectos de estela entre diferentes archivos con posiciones de aerogeneradores distintas.

### Obtención de los resultados

Para obtener un archivo con el mapa de producciones en forma matricial, en la tecla  de la figura 18, se genera el archivo con formato \*.GRD y el programa abre una ventana donde permite seleccionar el directorio de destino para guardarlo. Ese archivo servirá para obtener, posteriormente, el mapa gráfico de

producciones, vientos, velocidad media, frecuencias, etc.

Además, haciendo ↓ con el botón derecho del ratón sobre el archivo de datos climatológicos aparece una ventana desplegable en la que se pueden elegir varias opciones, entre ellas se marca *Reports* y luego *OVC report (Word)* y el programa genera en el momento un archivo de Word con el resumen de los datos climatológicos y un informe en inglés que se puede guardar donde convenga para utilizarlo, traducirlo o insertarlo como está posteriormente.

Haciendo lo mismo sobre la estación meteorológica, el atlas y el archivo donde se encuentran los aerogeneradores se van generando informes de cada tema en formato Word o html, que posteriormente se pueden utilizar en el documento de análisis, informe y/o proyecto correspondiente.

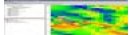

La versión actual del WAsP permite obtener también la tabla de interdistancias entre turbinas en formato Excel. Para ello se va al archivo de parque (*Windfarm*) y se selecciona como se representa en la figura 19, se genera un archivo de Excel que se puede guardar, imprimir, analizar, modificar, etc.

### Presentación gráfica de los resultados

Para presentar los resultados de forma gráfica, además de los resúmenes que el WAsP emite en formato \*.DOC en inglés, se utiliza el programa Winsurf o Surfer. Se trata de un GIS que admite también la introducción de datos en forma numérica. De este programa se va a obtener un

mapa de producciones con una escala de colores de mayor a menor superpuesta a la topografía del terreno. También se pueden situar las máquinas sobre el mapa anterior.

Aunque las nuevas versiones del programa WAsP facilitan ya mapas de producciones de forma gráfica, en el presente estudio, para presentar los mapas de producción eólica se continúa utilizando el programa Surfer, dada su mayor calidad, resolución y la mejor presentación de los resultados. En este caso se ha utilizado la versión 8 del programa. No es la última, pero hace el trabajo perfectamente.

El archivo con formato \*.GRD se obtiene abriendo en WAsP la ventana *Resource Grid* ↓ *Spatial view* ↓ *Edit grid* y ajustando el tamaño de la cuadrícula de cálculo y la extensión de la zona que se pretende calcular (v. Fig. 10). Con tamaños de retícula de menos de 100 metros de lado, el cálculo requiere una potencia de computación importante; de lo contrario, produce demoras excesivas (en los ordenadores normales pueden ser del orden de muchas horas o días). Lo normal es calcular AEP con la tecla  aunque se pueden realizar más cálculos. Una vez terminado y grabado, en la tecla  se genera el archivo con formato \*.GRD y el programa abre una ventana donde permite seleccionar el directorio de destino para guardarlo. Este archivo es una matriz numérica de datos que precisa de un programa que la convierta en un dato gráfico a escala con el que se pueda trabajar.

Desde el programa SURFER, se abre el archivo con formato \*.GRD, creado anteriormente, como *surface*. Hay que hacer ↓ dos veces sobre el archivo y ajustar. Para ello se selecciona que represente una barra con la escala de color y se sitúa dicha escala sobre la hoja en un punto en que no obstaculice la visión de la parte fundamental del plano. Seleccionando la escala con el ratón y "tirando" de una esquina o de un lateral se puede ajustar el tamaño de la escala de colores. Haciendo doble ↓ en cada eje, en el botón *Label format* se ajustan las separaciones de millares y decimales, así como el intervalo entre las leyendas. Hay que ajustar además:

- Base map*
- Lighting* ↓ *None*
- Overlays* ↓ *Blend overlays and rface colors*
- View* ↓ *Tilt 90°* ↓ *Rotation 0°* ↓ *Field*



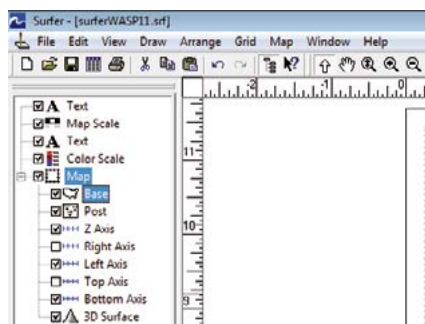


Figura 20. Árbol de Surfer con las distintas capas (incluye la escala de colores, el mapa de producciones, la topografía, los ejes, el mapa base, las máquinas y un plano adicional, todo superpuesto).

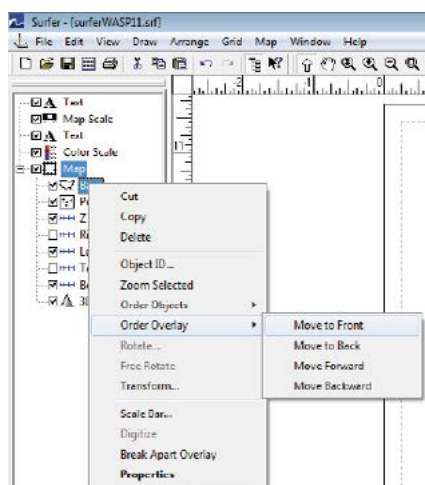


Figura 21. El mismo árbol, en el que se puede ver, que pinchando con el ratón sobre una de las capas, se puede alterar el orden de visualización.

160°↵Orthographic↵

Scale↵Proportional XY scale↵y a continuación ajustar la escala deseada en función del tamaño de papel elegido

Limits↵ajustar si procede

General↵Show color scale↵Material color y ajustar la escala de colores deseada

La escala de colores se puede elegir, al gusto del calculista, de muchos tipos, pero lo más recomendable es utilizar solo dos colores simples extremos (rojo y azul, azul y amarillo, rojo y verde, etc.) y dejar que el Surfer realice la gradación intermedia de la escala. Por ejemplo, del verde al rojo, del blanco al rojo, del blanco al azul, del azul al amarillo. Las escalas complicadas y con muchos colores son más difíciles de interpretar. Lo que se pretende es crear una documentación gráfica sencilla y que se comprenda con un golpe de vista.

El plano que se obtiene es un mapa de colores a escala y con ejes de coordenadas en UTM, pero no tiene referencia alguna al terreno sobre el que se sustentan. Para conseguir esto hay que insertar

un plano base en formato DXF. Para ello desde Autocad se guarda el archivo con la topografía en formato \*.DXF de Autocad 2000 o 2004. A continuación, se importa con el Surfer, se exporta en formato \*.DXF y se guarda, definiendo la ruta del directorio donde se quiere conservar. El programa Surfer lo reconoce de esta forma para insertarlo después como mapa base sin errores. Al insertarlo aparecen en la pantalla dos formas distintas no superpuestas. Entonces mediante *Edit↵Select all↵* se selecciona todo y para superponerlo se va a *Map↵Overlay maps↵*. Posteriormente habrá que volver a ajustar la escala, porque cambia. Este plano topográfico se puede dejar en color negro para distinguirlo de los de producciones en escala de colores. A continuación, se puede ajustar cuál es el dibujo que queda delante o detrás para que todo se vea en el orden correcto. Lo normal es situar el mapa de producciones en color al fondo, sobre él la topografía en negro y en primer plano las máquinas (Figs. 20 y 21).

Lo normal es que sobre este conjunto de mapa de producciones y topografía se coloquen las máquinas que se pretenden situar sobre el terreno. Desde el WAsP se exporta el listado de los aerogeneradores al portapapeles y desde este se inserta en un archivo de Word y se sustituyen los puntos decimales por comas. A continuación, se copia en un archivo de Excel con el orden siguiente: X Y nº de máquina (*label*)

No se pone encabezamiento ninguno. Al importar el archivo con el listado de las coordenadas de las máquinas en el formato expresado, el programa Surfer 8 preguntará cuál de las hojas del libro de Excel contiene los datos que nos interesa introducir en el mapa y están en el formato que se ha expresado.

Para representar el símbolo del aerogenerador sobre el plano hay varios formatos de la letra denominados *Windings* y *Windings2*, que contienen símbolos que se adaptan a este caso concreto como:  $\blacktriangle$   $\oplus$  u otros similares.

Desde el programa Surfer seleccionar *MAP↵POST*, posteriormente, elegir la ruta de acceso a la hoja de cálculo, abrir e insertar desde el tipo de letra *Windings2* el símbolo  $\blacktriangle$  u otro similar y asignarle un color que destaque sobre el fondo de la escala de colores de las producciones. Se puede seleccionar el tipo de letra, tamaño y situación de la etiqueta con el número de cada máquina. A continuación, se selecciona todo con

*Edit↵Select all↵* y se superpone los mapas con *Map↵Overlay maps↵*. Posteriormente, hay que ajustar la escala de nuevo, porque cambia y si es preciso se modifica el orden de visualización para que se vea todo. El tamaño de papel y la orientación de la hoja vertical o apaisada se seleccionan en *File↵Page setup↵*.

Para finalizar se puede imprimir directamente el archivo desde el programa Surfer (la forma más fácil) o convertirlo a formato \*.PDF, pero con la salvedad de que al ser un fichero con mucha "masa" de color, el archivo tendrá un tamaño muy grande y se tardará tiempo en generar y será difícil de manejar.

Agradecimiento

Se agradece especialmente a la empresa propietaria del parque eólico que se ha utilizado como patrón, Promociones Energéticas del Bierzo SL, la cesión de los datos meteorológicos que sirvieron para el cálculo del citado parque, así como otras muchas facilidades que han prestado.

BIBLIOGRAFÍA

Cádiz Deleito, J.C. *La energía eólica: tecnología e historia*. Blume.  
 Castro Gil, M.; Cruz Cruz, I. *Energía eólica*, Monografías técnicas de energías renovables, Progensa, Promotora General de Estudios S.A.  
 García Galludo, M. *Energía eólica*, Progensa.  
 Gipe, P. *Energía eólica práctica*, Promotora General de Estudios S.A.  
 Le Gourieres, D. *Energía eólica: Teoría, concepción y cálculo práctico de las instalaciones*, Masson S.A.  
 Mortensen, N., Landberg, L., Troen, I., Petersen, E. *Wind atlas and application program (WAsP)*, Riso National Laboratory.  
 Petersen, *Wind atlas of Denmark*, Riso.  
 Rodríguez Amenedo, J.L.; Burgos Díaz, J.C.; S. Arnalte Gómez, S. *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*, Rueda.  
 Varios autores, *Principios de conversión de la energía eólica*, CIEMAT.  
 Zapico Gutiérrez, P.; García Merayo, P. y Silván Sánchez, F. *Evaluación del recurso eólico utilizando el modelo informático WAsP*. Técnica Industrial, nº: 256, Ed. Fundación Técnica Industrial, 2005; págs. 62-68,  
 Zubiaur, R., Martín, F. *Performance and limitations of Wind Simulation Models in NW of Spain*, EWEC 1993.

**Pablo Zapico Gutiérrez** es Doctor por la Universidad de Valladolid. Máster oficial en energías renovables, ingeniero técnico industrial e ingeniero técnico de minas. Universidad de León. Área de ingeniería eléctrica. Dpto. de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática.

**Pedro García Merayo**. MBA. Ingeniero industrial, ingeniero de minas y director del grupo ERBI. Director General del grupo Energías Renovables del Bierzo.

**Fernando Silván** es ingeniero industrial. Grupo ERBI. **José Alejandro Alonso de Linaje Diez** Máster en ingeniería industrial. Graduado en ingeniería mecánica, graduado en ingeniería aeroespacial. Actualmente trabaja en la División de Ingeniería de Renault, Valladolid.