

DESARROLLO DE SOFTWARE VISUALIZADOR DE DATOS PROVENIENTES DE MAPAS EÓLICOS -PRIMERA ETAPA-

Lidia Ferreyra¹, Juan M. Neira Zilli², Claudia Palese²
lidiaferreyra@hotmail.com

¹Departamento de Ingeniería Civil

²Departamento de Mecánica Aplicada

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue

RESUMEN

Los resultados de los mapas eólicos frecuentemente son utilizados en la evaluación del recurso con la finalidad del aprovechamiento de la energía eólica. Sin embargo, hay otras aplicaciones de estos productos, como por ejemplo, en agronomía, forestación, ingeniería civil, ingeniería eléctrica, erosión eólica, arquitectura, fruticultura, defensa civil (prevención de accidentes y catástrofes), planificación de tareas de campo (industria del petróleo, civil, agrimensura, agricultura, vías de comunicación), etc. En general, los productos del mapeo eólico son archivos numéricos, en formato vectorial. El objetivo de este trabajo es desarrollar un software que exhiba estos resultados de manera que las características del viento sean fácil y rápidamente resumidas y conocidas, de tal forma que, puedan ser utilizados por distintos usuarios con diversidad de intereses. Para la producción del mapeo eólico se utiliza un sistema de información geográfica que tiene acoplado un modelo diagnóstico de conservación de la masa dentro de la capa límite planetaria. Se utiliza el lenguaje Visual C#, para el software desarrollado y se aplica a un área en el Cerro Chapelco y sus alrededores del Departamento Lácar (Provincia del Neuquén). Los resultados, de tres niveles respecto del suelo (10 m, 30 m y 50 m), se visualizan en forma gráfica de toda el área: elevación del terreno, velocidad media del viento y densidad de potencia eólica; y en forma tabulada por píxel seleccionado: velocidad media por dirección, distribución de frecuencia de la dirección, velocidad media del viento omnidireccional y parámetro de forma de la función de densidad de probabilidad de Weibull.

ABSTRACT

The wind maps are often used in the assessment the wind resource with the goal of wind energy utilization. However, there are other applications of these products, such as agronomy, forestation, civil engineering, electrical engineering, wind erosion, architecture, fruit farming, civil defence and emergency management of natural hazards (prevention of accidents and disasters), field task planning (industry petroleum, civil, surveying, agriculture, roadways), etc. Generally, the wind maps are numerical files in vector format. The aim of this work is to develop a software that displays the results so that the wind characteristics are easily and quickly summarized and known. In this way, the results can be used by different users with different interests. To obtain wind maps a geographic information system which incorporated a diagnostic model of mass-conservation (within the planetary boundary layer) is utilized. The Visual C# language is used for the developed software and it is applied to an area located at Chapelco (Lácar Department, Neuquén Province). The results of the three levels above ground (10 m, 30 m and 50 m) are displayed in graphical form of the whole area: terrain elevation, average wind speed and average wind power density; and in tabular form by selected pixel: average wind speed per direction, frequency by direction, average wind speed omnidirectional and the shape parameter of the Weibull probability density function.

Palabras clave: mapas eólicos, software visualizador de mapas eólicos, interface gráfica de mapeos eólicos.

1) INTRODUCCIÓN

Un mapa del potencial eólico (o mapa eólico) provee las características del viento y la distribución del recurso en una amplia región. La cuantificación del recurso posibilita avanzar en los estudios de factibilidad de parques eólicos para aplicaciones que incluyen la generación de electricidad a escala comercial, sistemas conectados a la red y de menor escala en sistemas aislados. Sin embargo, hay otras aplicaciones de los datos del viento que producen dichos programas. Por ejemplo, pueden ser utilizados en agronomía, forestación (Suarez y otros, 1999; Quine, 2000; Venäläinen y otros, 2004), ingeniería civil (Price y otros, 2008), eléctrica, erosión eólica, arquitectura, fruticultura, defensa civil (prevención de accidentes y catástrofes), planificación de tareas de campo (industria del petróleo, civil, agrimensura, agricultura, vías de comunicación), energía eólica (Potts y otros, 2001), etc. Son de mucha utilidad para distintos tipos de usuarios, por lo tanto, la presentación de los datos debe estar expuesta en una forma adecuada y fácil de interpretar.

La visualización de los resultados de los mapas eólicos es un tema abierto para el desarrollo de programas de computadora que permitan una fácil comprensión de lo obtenido. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es desarrollar un software libre que permita visualizar los resultados de mapeos eólicos de tal manera que las características del viento en el área analizada sean fácil y rápidamente resumidas y conocidas. El trabajo aquí presentado constituye la primera etapa del desarrollo del software. En la segunda etapa se incluirá en forma de tablas el cálculo de las velocidades extremas del viento esperadas para el lugar (Lassig, 1999), el parámetro de escala de la función de densidad de probabilidad de Weibull y el coeficiente de la cortante vertical de la velocidad del viento. Mediante gráficos se exhibirán las distribuciones de la velocidad media por dirección y de la rosa de los vientos.

Hay que cumplir con dos pasos para que los resultados de un mapa eólico puedan ser utilizados:

- a) Primero, se genera el mapa eólico del área a estudiar. Para ello, en este trabajo se utiliza un sistema de información geográfica que tiene acoplado un modelo diagnóstico de conservación de la masa en la capa límite atmosférica. Como ejemplo, se estudia un área al sudoeste de la Provincia del Neuquén. En la Sección 2 se presenta una breve descripción del mismo y de los datos utilizados.
- b) Luego, se aplica el software de visualización a los resultados. Es importante destacar que funciona para mapas eólicos de cualquier zona. Sólo requiere que la información inherente a éstos se encuentre en archivos que tengan el formato adecuado, mencionado en la Sección 3. En este artículo, se expone a modo de ejemplo, la aplicación al área indicada en el ítem anterior. En la Sección 3 se describe en forma detallada cómo se ha desarrollado el software.

2) MAPEO EÓLICO

Se emplea el software ArgentinaMap, cerrado para el usuario, derivado de WindMap™ desarrollado por Brower M. (Brower & Co., Andover, MA, USA, 1998). Es un sistema de información geográfica al que se le ha incorporado un modelo numérico que representa la circulación en las capas bajas de la atmósfera simulando los efectos orográficos, de rugosidad y de la estabilidad térmica vertical en los vientos locales que son conducidos por el flujo de escala sinóptica.

El modelo satisface la ecuación de conservación de la masa, es del tipo diagnóstico, utiliza interpolación objetiva junto con un conjunto de ecuaciones primitivas que proporciona datos de viento medio de un área. Este modelo calcula el campo de velocidad del viento, que se desvía la mínima cantidad posible de un campo de viento inicial derivado de datos observados. El ajuste necesario para lograr cero divergencia se determina mediante la resolución iterativa de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales, por el método de elementos finitos. Para ello se establece una malla tridimensional

a lo largo de la región de interés y las variables claves se definen en los centros o las caras de cada celda de la grilla. El campo de viento se ajusta en cada punto hasta que la divergencia se reduce por debajo de un nivel de tolerancia. En Palese y otros (2009) y en Lassig y Palese (2011) se lo describe.

El dominio de aplicación abarca desde $40^{\circ} 01' 40,1129''$ lat. Sur a $40^{\circ} 23' 18,1573''$ lat. Sur y desde $71^{\circ} 34' 46,6686''$ long. Oeste a $71^{\circ} 05' 12,1693''$ long. Oeste. La resolución espacial horizontal utilizada es 94 m en ambas direcciones horizontales. El dominio corresponde a una malla de 436 elementos en x y 415 elementos en y, que representa una superficie 16 ha. El espesor total de la malla es 3.613 m, se dividen en 15 niveles verticales y tienen una separación espacial vertical que es una progresión geométrica, cuya finalidad es incrementar la resolución cerca del suelo.

Los datos topográficos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) utilizados tienen 94 m de resolución espacial, 20 m de error en la horizontal y 16 m en la vertical. Para producir el mapa digital de la longitud de rugosidad (z_0) se empleó la metodología indirecta descrita en Palese (2009) y se utilizaron datos satelitales del sensor ETM+/Landsat7 del 2 de Febrero de 2005 a las 11:30 hs. La definición del esquema de clasificación de la imagen se basó en la necesidad de identificar 7 tipos de cobertura del suelo. El mapa de z_0 fue rectificado a 94 m de resolución espacial.

La inicialización se efectuó con datos medidos de velocidad y dirección del viento que fueron consistidos. Debido a la variabilidad interanual de la velocidad del viento en la zona se plantea un análisis por semestres, en este trabajo se presentan los resultados del período entre Noviembre a Abril. Se utilizan los datos de 21 años de Chapelco Aero del Servicio Meteorológico Nacional, 5 años de dos estaciones de la Autoridad de Cuencas de los ríos Limay, Negro y Neuquén, 1 año de mediciones de la empresa Cerro Chapelco y de una estación de la Universidad Nacional del Comahue ubicada en San Martín de los Andes. Los datos de viento de altura son estimaciones del modelo atmosférico del sistema Global Data Assimilation System (GDAS/NOAA). Se utilizaron los meses de Noviembre a Abril de un período de 5 años. Los vientos corresponden a las alturas de 1.498 m, 3.070 m y 5.700 m.

En el semestre, las alturas medias de la capa de superficie (z_{cs}) y de la capa límite atmosférica (z_{cla}), cuyos valores corresponden a la posición central del dominio y son constantes a lo largo de este, fueron estimadas utilizando datos GDAS/NOAA. Para calcular z_{cla} se usó el promedio de los datos: 533 m; y para z_{cs} se utilizó el 10 % de la altura correspondiente a una ocurrencia acumulada del 90 %: 120 m (Palese, 2009). La longitud de estabilidad de Monin–Obukhov, L , de mayor ocurrencia en el semestre se estimó con la expresión propuesta en Moreira y Tirabassi (2004) que relaciona L con z_0 según las clases de estabilidad atmosférica. Estas últimas fueron obtenidas del sistema GDAS/NOAA. Se concluyó que la capa límite con estabilidad neutral es la de mayor frecuencia (72 %).

La configuración para la inicialización se ajusta a un intervalo de clase para la dirección del viento de 30° . Se fija en 270 m el radio de representatividad de las mediciones, según Potts y otros (2001). El máximo residuo con el que finaliza el proceso iterativo se fijó en 10^{-5} s^{-1} . En cada iteración el modelo ajusta el campo de viento de tal forma que la velocidad en cada estación tenga una diferencia de hasta 5 % (tolerancia) con respecto a los datos de superficie medidos. Se solicita al programa que calcule los campos de viento a 10 m, 30 m y 50 m sobre el nivel del suelo.

El ajuste logrado entre las velocidades medidas y las estimadas con el modelo muestra un R^2 mayor a 0,97. Los errores relativos porcentuales son inferiores a 8 % que representa una diferencia de velocidades inferior 0,83 m/s. Se considera que este error se encuentra dentro de los límites tolerables. Los campos de la velocidad media del viento a distintas alturas respecto del suelo generados con ArgentinaMap se guardan en un archivo de extensión “.RSF” (Resource File), uno por cada nivel, que contiene los datos de un mapa eólico del dominio. En adelante se nombrará a tal archivo como archivo *RSF*.

3) SOFTWARE VISUALIZADOR DE MAPAS EÓLICOS

Se desarrolla un software de visualización de mapas eólicos, inicialmente denominado “EOMap”, utilizando el lenguaje Visual C#, perteneciente al paquete Microsoft Visual Studio 2008 (MSDN, 2008). La elección del lenguaje de programación fue condicionada por la necesidad de portabilidad del software de manera que pueda ejecutarse correctamente en la mayor cantidad posible de sistemas operativos y arquitecturas de computadoras. “EOMap” toma como entrada los datos provenientes del archivo *RSF* que es un archivo de texto que contiene varias columnas: (i) Posición X del nodo de la malla en la dirección Oeste – Este (m); (ii) Posición Y del nodo de la malla en la dirección Sur – Norte (m). Ambos se refieren al sistema de coordenadas geográficas planas Universal Transverse Mercator zona 19 Sur (UTM -19); (iii) Altura sobre el nivel del mar (m); (iv) Altura sobre el nivel del suelo del mapa resultante (m); (v) Velocidad media del viento (omnidireccional) (ms^{-1}); (vi) Parámetro de forma, k , de la distribución de Weibull (adimensional); (vii) Densidad de potencia del viento (Wm^{-2}); (viii) Cantidad de direcciones en las que se dan los resultados, 12 en este trabajo; y (ix) Frecuencia ($\times 10\%$), velocidad media ($\times 10 \text{ ms}^{-1}$) y parámetro k ($\times 100$) en cada dirección. Después de leer los estos datos del archivo *RSF*, el programa permite visualizar por pantalla mapas de la elevación del terreno, de la velocidad media y de la densidad de potencia eólica de cada zona. Además, para cada punto de un mapa muestra todos los datos inherentes a éste en la misma ventana.

Para explicar el modelo de la programación de “EOMap” se utilizan dos tipos de gráficos pertenecientes a UML (Unified Modeling Language):

(a) Diagramas de Casos de Uso: Permiten expresar quién usa la aplicación y qué puede hacer con ésta. No se muestran los casos de uso en detalle, solamente se resumen algunas de las relaciones entre los casos de uso y los actores (usuarios y sistemas externos). Por lo tanto, en este diagrama no se muestra el orden en el que se llevan a cabo los pasos para lograr los objetivos planteados.

(b) Diagramas de actividades: Sirven para describir un flujo de trabajo a través de una secuencia de acciones (actividades). Aquí, se utilizan para describir los pasos que se llevan a cabo en cada caso de uso. Además, se menciona cual es el disparador que pone en marcha la secuencia de actividades y si hay alguna restricción para poder iniciarla. Llamamos “precondiciones” a estas restricciones. En este artículo, se establece como precondición para todos los diagramas de actividades, que el sistema operativo y todo el entorno técnico donde se ejecuta la aplicación funcionen correctamente. Sólo se mencionan precondiciones cuando son distintas a la mencionada.

Es importante destacar que, si bien existen partes del programa cuyas acciones son secuenciales, esto no es así en gran parte de éste. En un diagrama de actividades, una actividad sólo puede realizarse cuando ha finalizado la anterior. Cuando exista secuencialidad entre casos de uso, es decir, que uno requiera la finalización del otro, esto se expresará también en un diagrama de actividades o se indicará en las precondiciones del diagrama de actividades asociado al caso de uso dependiente. De no ser así, se debe asumir que no hay secuencialidad.

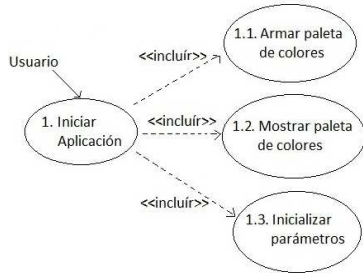
DIAGRAMAS DE CASOS DE USO:

- Diagrama general:

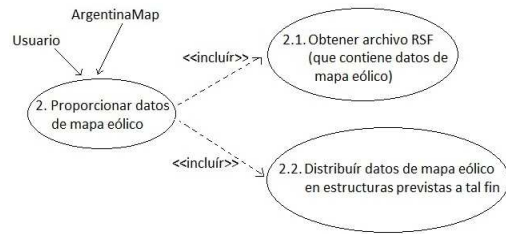


Diagramas detallados:

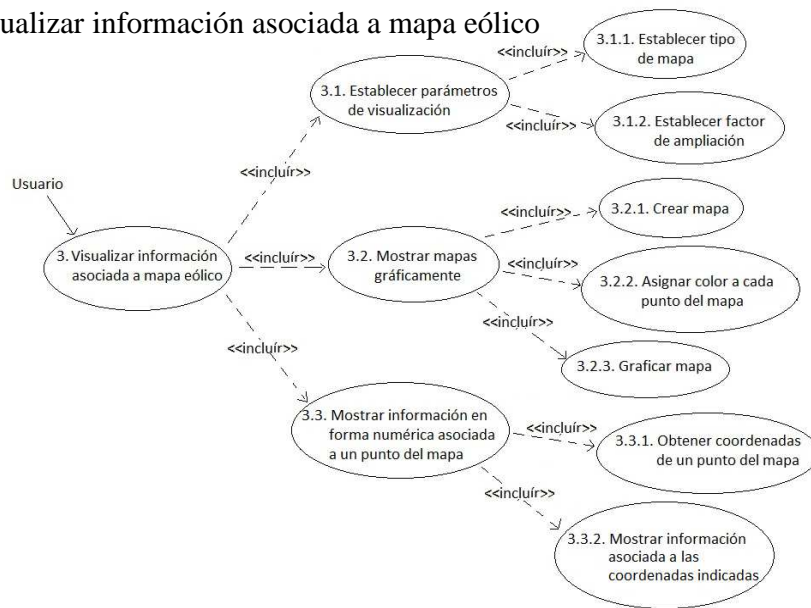
Caso de uso 1. Iniciar Aplicación



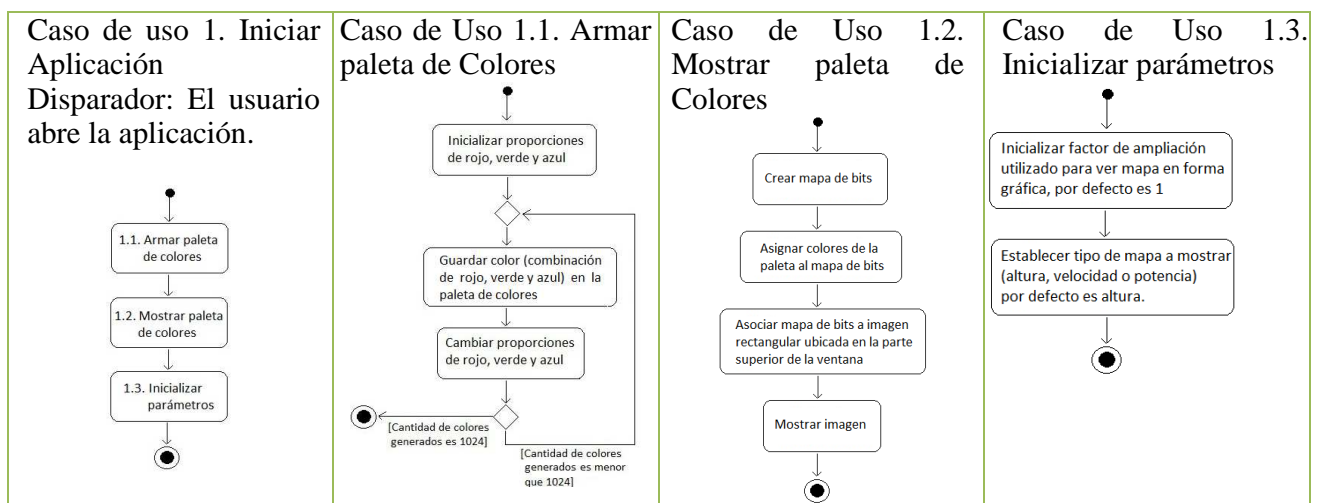
Caso de uso 2. Proporcionar datos de mapa eólico



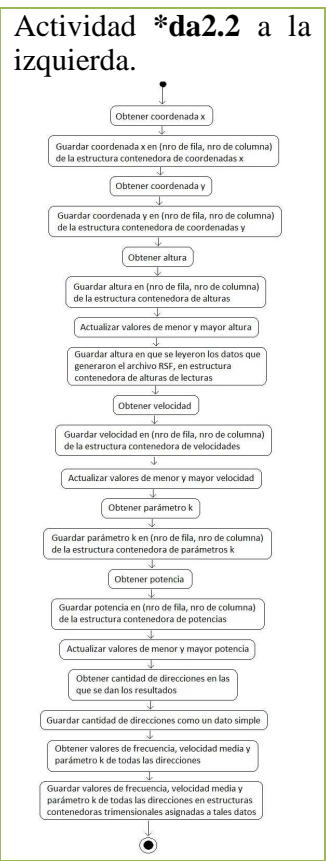
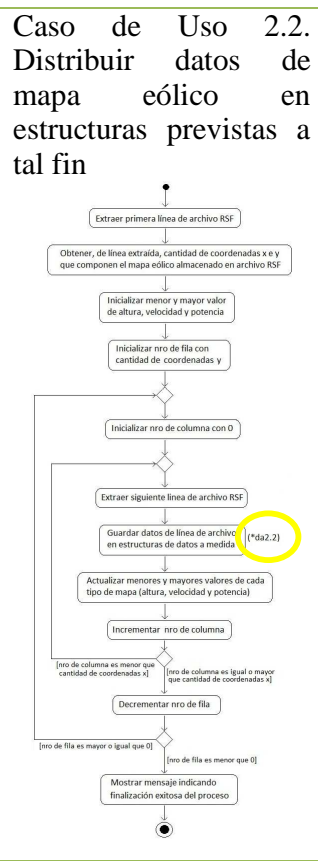
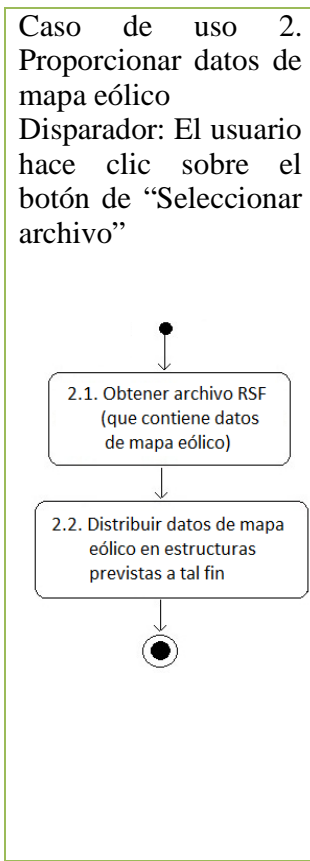
Caso de uso 3. Visualizar información asociada a mapa eólico



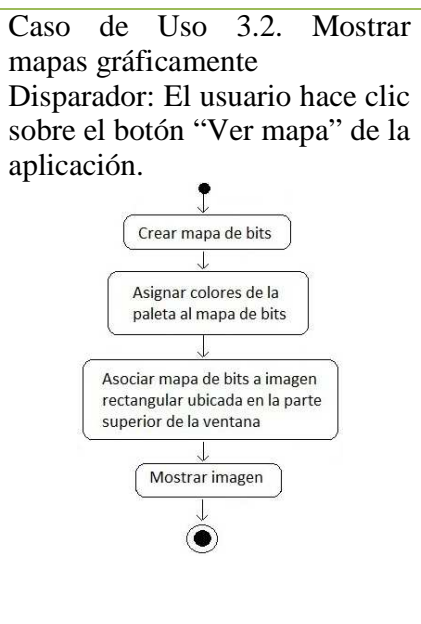
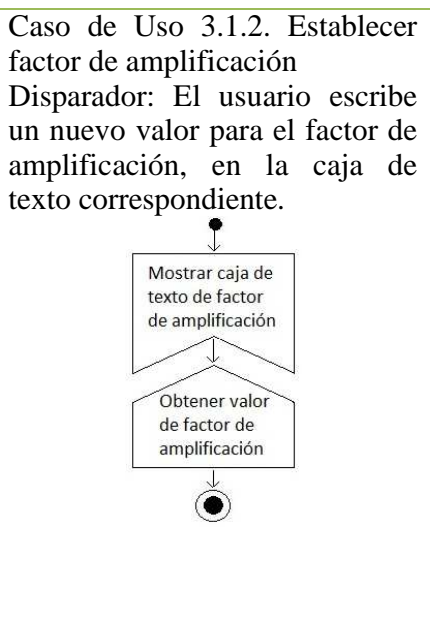
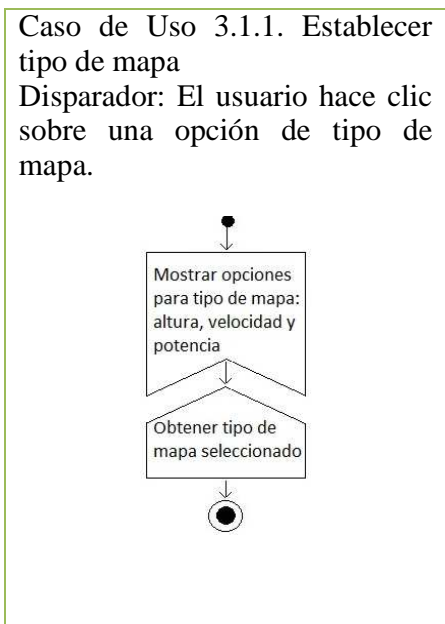
DIAGRAMAS DE ACTIVIDADES: En algunos casos, se deberá acercar la imagen (aumentar zoom) para leer correctamente el texto escrito.



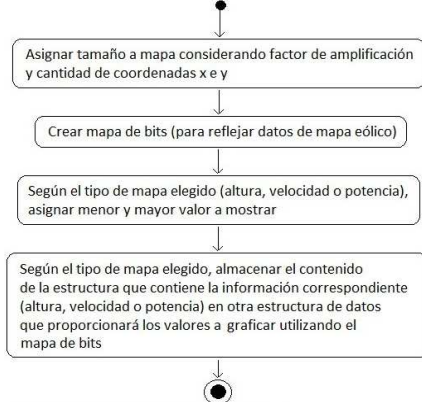
La actividad 1.3 es independiente de las anteriores en cuanto a datos pero se agregó en este diagrama porque dado el orden en que se codificaron estas actividades, la acción 1.3 se ejecutará sólo cuando termine de ejecutarse 1.2.



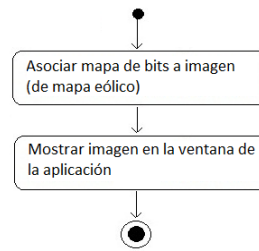
En el Diagrama de actividad correspondiente a Caso de Uso 2.2 el nro. de fila y nro. de columna son índices de estructuras bi y tridimensionales en las que se distribuye la información. Estas comienzan a indizarse a partir de 0. En este diagrama en particular, se exhibe un nivel de detalle mayor, con el objetivo de poner en evidencia el orden en que se almacenan las componentes de las estructuras. El Diagrama de actividades correspondiente a actividad *da2.2: “Obtener” un dato implica extraerlo de la línea de archivo *RSF* mencionada en diagrama anterior.



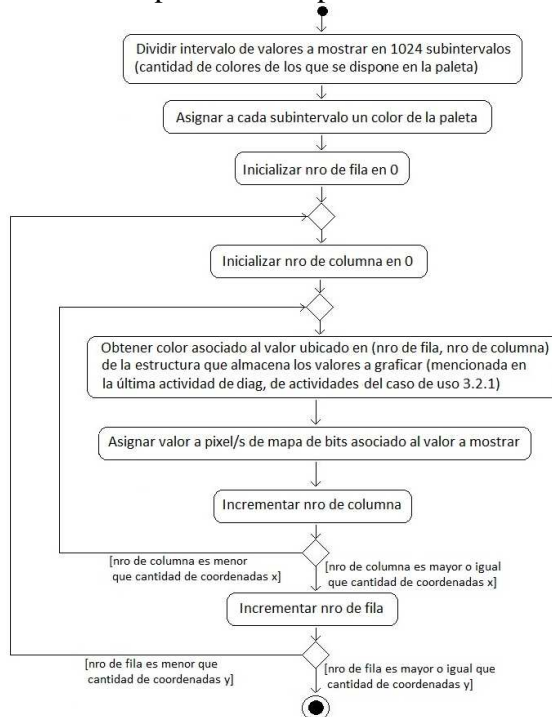
Caso de Uso 3.2.1. Crear mapa



Caso de Uso 3.2.3. Graficar mapa



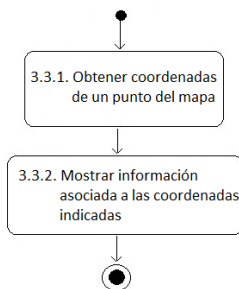
Caso de Uso 3.2.2. Asignar color a cada punto del mapa



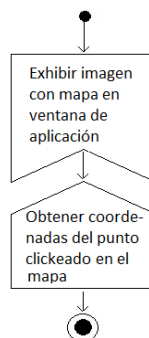
Caso de Uso 3.3. Mostrar información en forma numérica asociada a un punto del mapa

Disparador: El usuario hace clic sobre un punto de la imagen del mapa que está en la ventana de la aplicación.

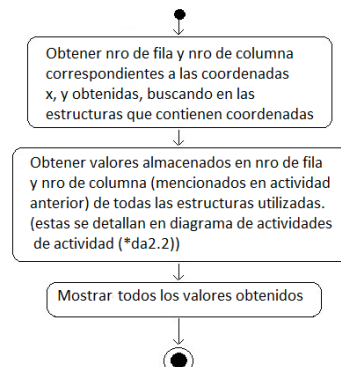
Precondición: Se deben haber finalizado todas las actividades del caso de uso 3.2.



Caso de Uso 3.3.1. Obtener coordenadas de un punto del mapa



Caso de Uso 3.3.2. Mostrar información asociada a las coordenadas indicadas



4) RESULTADOS

En la Figura 1 se muestra la ventana que se abre al ejecutar EOMap. En un principio los casilleros están en blanco y no se visualiza ningún mapa. Mediante el botón “Seleccionar archivo”, se debe seleccionar el archivo *RSF* que contiene los datos de entrada. Entonces, los valores distribuidos en cada columna se almacenarán en arreglos bidimensionales excepto en el caso de las ternas de direcciones, en el que serán tridimensionales. Según el tipo de mapa elegido, el contenido de la matriz que contiene información correspondiente a elevación del terreno, velocidad o densidad de potencia, se asignará a un objeto denominado *bitmap*. Este es un mapa de bits compuesto por píxeles indizados mediante coordenadas bidimensionales (x, y), cuyo origen (0, 0) está en la parte superior izquierda del mapa. El orden en que se almacenan los datos en los arreglos no es el del archivo del cual provienen, sino el determinado por este objeto. Una vez completo, el *bitmap* se asigna a un control visual que permite observarlo en la ventana. Cada píxel exhibido representa un valor de un dato en particular y tiene un color asociado. A tal fin se ha creado y utilizado una paleta de 1024 colores que van desde el azul al rojo, pasando por cian, verde, amarillo y naranja, en ese orden. El azul representa al menor valor de la muestra y el rojo al máximo.

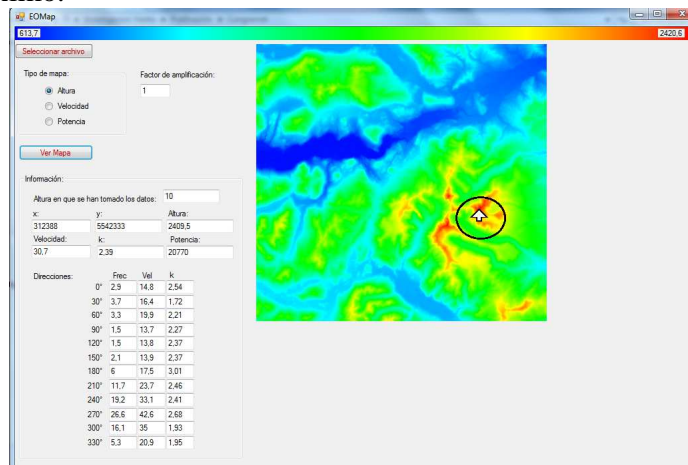


Figura 1: A la izquierda se observan los valores generados con el programa del mapeo eólico para el punto señalado con una flecha. Las alturas del área analizada varían entre 613.7 m a 2420.6 m sobre el nivel del mar.

En la parte superior de la ventana se ubica la paleta de colores. Además se puede establecer el tamaño del mapa graficado utilizando el factor de ampliación, que debe ser un valor entero y positivo. Entonces, la dimensión del mapa mostrado será (ancho original x alto original) x factor de ampliación. No se han utilizado algoritmos para suavizar el pixelado en la ampliación, ya que se prefiere perder en estética del mapa para ganar en veracidad de los datos representados. Resumiendo, para generar el mapa requerido, se debe:

- Seleccionar el archivo *RSF* correspondiente.
- Elegir el tipo de mapa a mostrar, si es distinto al que se observa.
- Ingresar el factor de ampliación, si es distinto al que se observa.
- Hacer clic en botón “Ver mapa”

Después de estos pasos, se exhibirá el mapa por pantalla y en la paleta de colores se observará el menor valor sobre el color azul y el mayor sobre el rojo. Por ejemplo, en la Figura 1 las elevaciones del área analizada varían entre 613.7 m a 2420.6 m sobre el nivel medio del mar. Haciendo un clic sobre un punto cualquiera del mapa, se podrá ver abajo y a la izquierda toda la información asociada a tal punto, como se ve en la misma Figura.

Toda la información utilizada en este proceso, queda almacenada en variables compuestas (arreglos) y simples, cuya estructura está pensada en función de su uso, que permanecen temporalmente en RAM (memoria de acceso al azar) para seguir siendo procesada en la siguiente etapa de desarrollo. Es claro que el acceso a RAM, es más rápido que a archivos, lo cual agiliza el cálculo posterior y dado que el volumen de información conocido hasta el momento y las características de los equipos lo permiten, se considera una buena opción. Habrá que estar atentos en el futuro al volumen de información recibido para determinar si es necesario un cambio en esta implementación.

Los valores mostrados en forma numérica y gráfica han sido testeados revisando los datos de origen. Se ha verificado para una cantidad razonable de puntos (x, y) que la información asociada a éstos, almacenada en el sistema, es la correcta. En este proceso fue útil convertir los archivos *RSF*, que son archivos de texto, a formato .xls y buscar las líneas de datos allí.

Se procesaron archivos con registros a 10 m, 30 m y 50 m de altura sobre el nivel del suelo. En la Figura 1 se observa altura del terreno con respecto al nivel del mar de cada nodo de la malla. También se generaron los mapas de la velocidad media del viento (Figura 2 (a)) y de la densidad de potencia eólica (Figura 2 (b)). En cada caso, sólo se muestra la parte de la ventana donde se exhibe el mapa, el resto es como en figura 1.

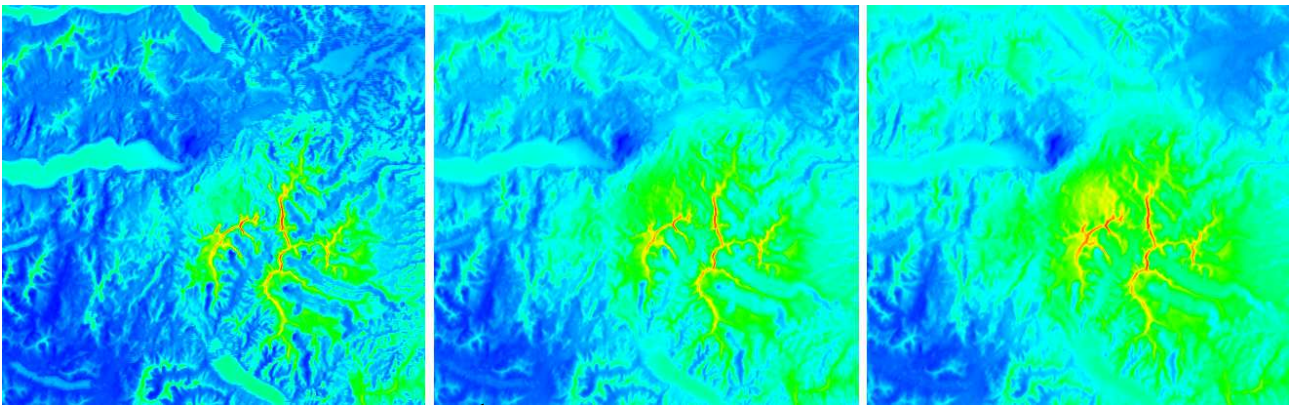


Figura 2: (a) Velocidad media (ms^{-1}) del semestre NOV – ABR. A 10 m de altura sobre el nivel del suelo, los valores varían entre 2,4 m/s y 37,0 m/s. A 30 m, entre 4,4 m/s y 37,3 m/s. A 50 m, entre 5,4 m/s y 35,6 m/s.

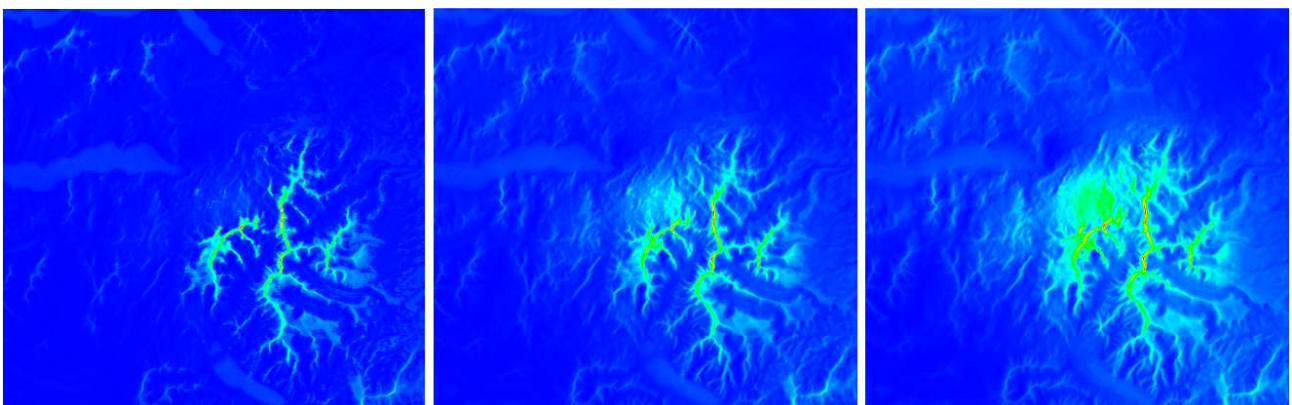


Figura 2: (b) Densidad de potencia eólica media (Wm^{-2}) del semestre NOV – ABR. A 10 m de altura sobre el nivel del suelo, los valores varían entre 13,0 W/m^2 y 43750,0 W/m^2 . A 30 m, entre 96,88 W/m^2 y 39910,0 W/m^2 . A 50 m, entre 169,4 W/m^2 y 34360,0 W/m^2 .

5) DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Después de efectuar una cantidad razonable de corridas del programa de visualización de datos, se ha confirmado que el lenguaje y el diseño de programación han resultado satisfactorios para lo requerido por la aplicación hasta el momento.

El software ha funcionado correctamente. Los datos leídos se muestran en forma inmediata. Sólo se produce una demora en la lectura del archivo si es lo suficientemente extenso. Para tener una idea, la lectura de un archivo *RSF* de 180940 líneas demora aproximadamente 5 segundos. Es un dato a tener en cuenta para las próximas muestras a procesar.

Es importante conservar la característica de modularidad con la que se ha construido el software y así contribuir, junto con otras cosas, a su escalabilidad para que esté abierto a la implementación de nuevas funcionalidades que se requerirán a futuro.

En cuanto a la visualización de los resultados se puede apreciar que es clara y están correctamente graficados. Mediante una simple inspección visual se sabe cuánto y cómo varía la velocidad y la densidad de potencia en la horizontal y teniendo en cuenta la altura sobre el nivel del suelo.

AGRADECIMIENTOS: Los foros en la web en los que se publican artículos referentes a objetos y métodos fueron consultados durante el desarrollo del software, por ejemplo, www.codeproject.com, www.vcskicks.com. Este trabajo fue financiado mediante el proyecto 04/I178 de la U. N. Comahue.

REFERENCIAS

- Lassig, J.L. y C. Palese.**, 2011. Mapa eólico a 50 metros de altura en la zona norte de la provincia del Neuquén. *Mecánica Computacional*, Vol. XXX, 2669-2684.
- MSDN (Microsoft Developer Network)**, 2008. Ayuda de Visual C# provista por Visual Studio 2008. También en la web: msdn.microsoft.com.
- Palese, C.**, 2009. Campo de viento en el centro-este de la Provincia de Neuquén, Tesis de Magíster, FCEyN, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Palese, C., J.M. Gardiol, y J.L. Lassig**, 2009. Mapas de velocidad media del viento en el Centro-Este de la provincia de Neuquén, *Meteorológica*, 34, 17-27.
- Potts J.R., S.W. Pierson, P.P. Maticen, J.R. Harnel and V.C. Babau**, 2001. Wind energy resource assessment of western and central Massachusetts. *Proceedings American Institute of Aeronautics and Astronautics*, AIAA-2001-0060.
- Price R.L., J.A. Puckett and M.G. Barker**, 2008. Use of wind power maps to establish fatigue design criteria for traffic signal and high-mast structures. *Mountain-Plains Consortium and University of Wyoming*.
- Quine C.P.** , 2000. Estimation of mean wind climate and probability of strong winds for wind risk assessment. *Forestry* 73 (3), 247–258.
- Suárez J.C., B.A. Gardiner and C.P. Quine**, 1999. A comparison of three methods for predicting wind speeds in complex forested terrain. *Meteorol. Appl.* 6, 329–342.
- Venäläinen A., H. Zeng, H. Peltola, A. Talkkari, H. Strandman, K. Wang and S. Kellomäki**, 2004. Simulations of the influence of forest management on wind climate on a regional scale. *Agricultural and Forest Meteorology*; 123: 149–158.