

## **EVALUACIÓN DEL RECURSO EOLICO DEL DEPARTAMENTO CONFLUENCIA DE LA PROVINCIA DEL NEUQUEN**

Néstor Warchomicka<sup>1</sup>, Claudia Palese<sup>1</sup>, Graciela Pedro<sup>2</sup>, Héctor Mattio<sup>3</sup> y Jorge Lassig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional del Comahue –Fac Ing-, Buenos Aires 1400, Neuquén, Neuquén, Argentina, palese@uncoma.edu.ar

<sup>2</sup>Ente Provincial de Energía del Neuquén -EPEN-, Buenos Aires 283, Neuquén, Neuquén, Argentina, gpedro@epen.gov.ar

<sup>3</sup>Centro Regional de Energía Eólica -CREE-, Laprida 15, Rawson, Chubut, Argentina, mattio@eolica.com.ar

**RESUMEN:** Se realizó el mapa de potencial eólico del Departamento Confluencia de la provincia del Neuquén para evaluar la energía eléctrica posible de extraer. El objetivo fue detectar los sitios más propicios para la ubicación de futuros parques eólicos. La zona de estudio se caracteriza por tener varias líneas de transmisión de alta tensión facilitando una conexión al Sistema Interconectado Nacional/Provincial en caso de instalarse un parque eólico. Para este trabajo se contó con herramientas modernas de procesamiento de datos, como un SIG que tiene incluido un modelo atmosférico numérico, llamado WindMap. Se determinaron las características geofísicas de la zona a través de sensores remotos, como los datos topográficos provistos por la NASA y el análisis y procesamiento de imágenes satelitales SAC-C. Con estas herramientas se logró la evaluación del recurso eólico obteniendo los mapas del campo de viento y de potencia eólica disponible a 50 metros de altura.

**Palabras clave:** eólica, recursos renovables, energías alternativas, viento.

### **INTRODUCCIÓN**

La energía eólica siempre fue una alternativa interesante para la producción de electricidad, pero solo en las crisis del petróleo pudo desarrollarse debido a sus costos. En el presente nos encontramos ante una escalada del precio del barril del crudo, y muy posiblemente esto lleve a que nuevamente la energía eólica se transforme en una fuente de producción de electricidad rentable. Si a esto le sumamos el déficit energético a corto plazo de nuestro país, y las posibilidades de asociaciones entre empresas hidroeléctricas y eólicas para generar contratos de oferta de generación asegurada, las posibilidades de que en un corto plazo se instalen en el país granjas eólicas para producir electricidad es una gran posibilidad.

En este marco, se ha decidido realizar en distintas Provincias Argentinas lo que se denomina el Mapa de Potencial Eólico para conocer las posibilidades de este tipo de explotación y sus posibles sitios; en el caso de la Provincia del Neuquén, esto está en marcha, pero mientras se lo ejecuta, se decidió realizar un primer mapa de potencial eólico en el departamento de Confluencia (sector Este de dicha Provincia), debido a dos razones fundamentales:

1. En parte dicha zona ha sido estudiada con anterioridad en algunos sectores, como en los alrededores de la ciudad de Neuquén (Lassig et al., 1999), en el lago Mari Menuco (Palese y Lassig 1997), y en el sector Neuquén-Cutral C6 con datos de tres estaciones meteorológicas (Palese, 1999, y Palese et al, 2000). Además es una región en donde hay varias estaciones meteorológicas funcionando desde hace varios años, y otras nuevas, por lo que la obtención de datos para el trabajo fue rápida y suficiente.
2. Debido a que por esta región de la provincia del Neuquén pasan varias líneas de alta y media tensión que se conectan con el Sistema Interconectado Nacional de Electricidad (Labriola y Palese, 2000), posibilitando su venta al mercado Nacional y/o Provincial en forma inmediata, sin necesidad de tener que construir extensas líneas de tensión para ello.

Para este trabajo se contó con herramientas modernas de procesamiento de datos, como son el Sistema de Información Geográfica que tiene incluido un modelo atmosférico numérico, llamado Windmap. También se determinaron las características geofísicas de la zona a través de sensores remotos, como los datos topográficos provistos por la NASA y el análisis y procesamiento de imágenes satelitales SAC-C. Con estas herramientas se logró la evaluación del recurso eólico en el departamento Confluencia obteniendo los mapas del campo de viento y de potencia eólica disponible; y las distribuciones de frecuencias de viento en las estaciones meteorológicas. La metodología seguida concuerda en gran medida con lo realizado por Potts y otros (2001) en el centro y oeste de Massachusetts.

## METODOLOGÍA

La evaluación del recurso eólico en el Departamento Confluencia se realizó con un Sistema de Información Geográfica (SIG) que incorpora un modelo numérico de simulación atmosférica, y con datos de mediciones de velocidad y dirección del viento.

### *WindMap*

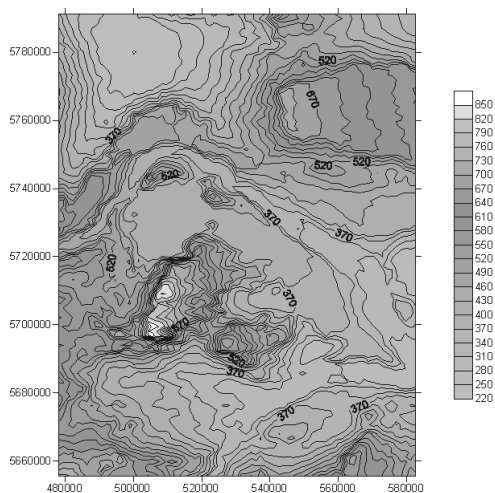
El software utilizado es el WindMap que está basado en el código NOABL (Numerical Objective Analysis of Boundary Layer -Análisis Objetivo de la Capa Límite Atmosférica-). Este es un modelo que satisface la ecuación de conservación de la masa y calcula el campo de velocidad del viento, que se desvía la 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 diferenciales parciales. Para ello se establece una malla de elementos finitos a lo largo de la región de interés, WindMap permite incluir una malla de 300 elementos en cada dirección horizontal y una discretización vertical de 15 elementos.

La aplicación de este software requiere el conocimiento geofísico del área en estudio ya que el campo de velocidad del viento depende fuertemente de ellos. Por lo tanto, a continuación se explica cómo fueron preparados estos dos mapas tanto el topográfico como el de la rugosidad superficial.

### *Topografía*

La orografía tiene una influencia directa en el flujo de viento y en su velocidad, por ejemplo, los vientos tienden a acelerarse sobre las colinas y montañas. Los datos orográficos fueron bajados de sitio web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS US Geological Survey) y son producto de mediciones efectuadas por el Trasbordador Espacial (NASA Space Shuttle) con dos radares instalados a bordo, en una campaña de mediciones de elevación del terreno que concluyó en el año 2000. Los datos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) tienen una resolución espacial de 90 m (3 arco segundo), un error en la horizontal de 20 m y en la vertical de 16 m.

La información topográfica SRTM, en el área de estudio, tiene errores que fueron corregidos empleando cartas del Instituto Geográfico Militar de Argentina (IGM). La zona seleccionada abarca desde 38.0°S al norte, 39.25°S al sur, 69.25°W al oeste y 68.0°W, que corresponde al Departamento Confluencia en su totalidad y pequeñas porciones de los de Picún-Leufú, Zapala y Añelo. El resultado se muestra en la Figura 1.



**Figura 1:** Mapa topográfico de la zona estudiada. Las curvas de nivel están expresadas en metros. Las coordenadas utilizadas son planas UTM zona 19 H.S. en metros.

La ventana utilizada cubre 286 x 293 píxeles representando una superficie de 104.6 km x 135.9 km, que se ajusta a una malla de elementos finitos en el WindMap cuya resolución en la dirección x es de 365.8 m y en la dirección y es de 463.9 m.

### *Rugosidad*

La rugosidad superficial reduce la velocidad del viento en las capas atmosféricas cercanas a la superficie terrestre. Los modelos numéricos de simulación atmosférica emplean para las parametrizaciones de la capa límite de superficie la teoría de la semejanza de Monin-Obukhov (Stull, 1988). Esta formulación requiere entre otros parámetros de la longitud de rugosidad aerodinámica ( $z_0$ ) para cada punto de la malla en el dominio de la simulación. WindMap permite entrar un mapa de rugosidad para representar las variaciones de las características de la superficie a lo largo de la región. La zona de la meseta está cubierta en su mayor parte

por vegetación baja con tronco muy corto o ramificado desde la base y asimilan energía con su follaje estacional o permanente, o con sus ramas verdes. La vegetación se ubica en forma muy dispersa dejando superficies de suelo desnudo. En un estrato inferior los acompañan plantas menores: suculentas, con bulbos o tubérculos, y efímeras. Los suelos de los valles irrigados están cultivados por especies caducas, principalmente árboles frutales: manzanos y perales, cercados en su mayoría por alamedas que se utilizan como cortinas rompevientos.

Dado que la región en estudio es principalmente un área con vegetación natural con un paisaje árido, se ha optado por estimar la rugosidad a través del conocimiento del tipo de cobertura del suelo y de la altura media de los obstáculos. Para ello se utilizó una escena del sensor MMRS/SAC-C (Multispectral Medium Resolution Scanner) del 20/Dic/2002. Este sensor tiene una resolución espacial de 175 m y cinco bandas espectrales. El satélite argentino SAC-C fue lanzado el 21/Nov/2000 y atraviesa la zona de estudio a las 11:30 hora local (Colomb y otros, 2004). Se prefirió una imagen de verano para que estuviera representado, sin confusiones, las condiciones de los cultivos en los valles irrigados y la vegetación de hoja caduca que crece en los cauces de los ríos afluentes.

La escena MMRS/SAC-C fue georreferenciada utilizando los puntos de control orbitales que se reciben con la imagen. Se usó una ecuación lineal para realizar esta corrección dando un error cuadrado medio RMS inferior a 0.5 píxel, se utilizó el método de muestreo del vecino más cercano con la finalidad de preservar los valores originales. Se generó una imagen compuesta con la combinación de las bandas 3, 4 y 5. A este producto se lo clasificó en forma no supervisada, con un clasificador rígido, con un nivel de generalización ancho y eliminando las clases menos significativas (menor que el 1 % del área total) como opción de agrupamiento. La clasificación de la imagen se basó exclusivamente en la habilidad del sensor en detectar las firmas espectrales de los distintos tipos de cobertura y usos del suelo. Dado que las áreas urbanas se confunden con suelo desnudo se procedió a delinear manualmente dos tipos de zonas, una de menor densidad poblacional con casas bajas y algunas arboledas y otra con alta densidad poblacional que corresponde al centro de la ciudad de Neuquén que tiene construcciones altas. (Reese y otros, 2002). Luego de delimitadas las 7 clases encontradas se las reemplazó por los datos de rugosidad correspondientes como se observa en la Figura 2.

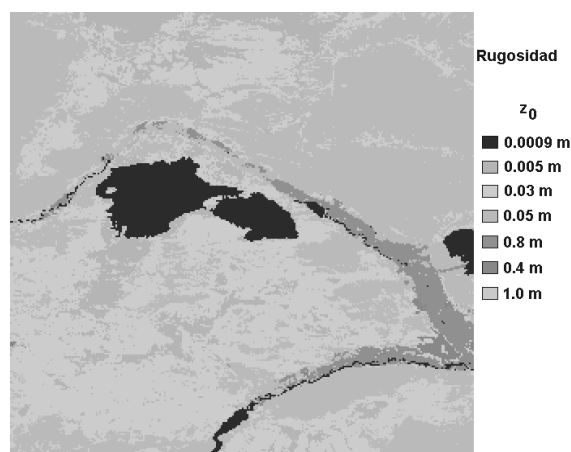


Figura 2: longitud de rugosidad expresada en metros estimada a través de una clasificación no supervisada de la imagen MMRS/SAC-C del 20/DIC/2002 (bandas reflectivas).

#### Datos meteorológicos

WindMap utiliza los datos de dirección e intensidad del viento medidos en superficie para inicializar el campo de viento, la selección y preparación de los datos es, entonces, una etapa muy importante en la elaboración del mapa eólico. WindMap además utiliza los datos de dirección e intensidad del viento en altura para extrapolar el campo inicial de viento a lo largo del dominio del modelo. Consecuentemente, a continuación se describe las fuentes y preparación de los datos meteorológicos que fueron incorporados en el modelo.

#### A. Datos de superficie

Se buscó información de lugares e instituciones que estuvieran o estén tomando datos meteorológicos en la Provincia del Neuquén. Los datos de dirección y velocidad del viento utilizados en esta investigación provienen de varias fuentes. En la Tabla 1 se presentan las estaciones de medición utilizadas, altura de los sensores, ubicación geográfica y fuente.

Se realizó el relevamiento de las estaciones meteorológicas para comprobar y obtener una descripción a campo de la instalación de los anemómetros, distancia de los mismos a los obstáculos más cercanos, altura de dichos obstáculos, etc..

**Tabla 1:** ubicación de las estaciones de medición de viento de superficie.

ESTACIÓN	ALTURA ANEM.	LATITUD	LONGITUD	PERIODO	INTERV MEDICION	FUENTE
Lago Mari Menuco	4 m	S 38° 32'	W 68° 33'	03/07/1996 - 30/06/1997	15 min	LISAMET
Aeropuerto Neuquén	10 m	S 38° 57'	W 68° 08'	01/01/1995 - 31/12/2004	1 hora	SMN
Neuquén UNCo	10 m	S 38° 56'	W 68° 03'	02/09/1983 - 31/05/1984	1 hora	LISAMET
Agua del Cajón	2,5 m	S 38° 56'	W 68° 21'	30/10/2000 - 26/07/2004	1 hora	CAPEX
Cerro California	35 m	S 39° 01'	W 69° 14'	07/01/1994 - 07/09/1998	1 hora	COPELCO
Cerro Bandera	30 m	S 38° 56'	W 69° 24'	21/06/1993 - 22/12/1994	1 hora	COPELCO
Aeródromo Cutral Có.	15 m	S 38° 56'	W 69° 15'	01/01/2000 - 31/01/2005	3 horas	DPRH

LISAMET: Laboratorio de Imágenes Satelitales Meteorológicas (UNComahue); SMN: Servicio Meteorológico Nacional; CAPEX: Central Térmica Capex; COPELCO: Cooperativa Eléctrica de Cutral Có; y DPRH: Dirección Provincial de Recursos Hídricos de Neuquén.

Los datos obtenidos fueron consistidos en forma gráfica. Se encontraron errores, por ejemplo, registros repetidos (fueron corregidos) y datos faltantes. El análisis estadístico de la intensidad y dirección del viento mostró un comportamiento similar al patrón de vientos que se espera para la zona de estudio. Luego se procedió a configurar los datos de acuerdo al protocolo que usa el software WindMap, esto es, velocidad en m/seg y dirección agrupada en una rosa de 12 direcciones y en grados.

Cada una de las estaciones es cargada por separado en el software, ingresando los siguientes datos: nombre de la estación, ubicación (x, y) en unidades UTM y altura del anemómetro. Se elige una de las estaciones para inicializar el campo de viento. En este caso se tomó la ubicada en el Aeropuerto de la ciudad de Neuquén, por tener el período más largo de medición. WindMap permite utilizar estaciones que no se encuentren ubicadas dentro de la malla que se va a calcular.

#### B. Datos de altura

Se utilizaron datos de altura de la posición 38.95°S, 68.07°W. Estos datos fueron obtenidos del sitio web de la Administración Nacional para la Atmósfera y los Océanos de Estados Unidos (NOAA) que provienen del modelo AVN-191 km- del Global Forecast System (GFS).

Se seleccionó el nivel de 700 hPa, puesto que tiene una altura promedio de 3050 m y no está afectado por la capa límite atmosférica que en la zona de Confluencia, en promedio, tiene una extensión vertical inferior a 1000 m en el 80 % de las veces y 3000 m en el 99 % de los casos. Se recopilaron 5 años de información de dirección e intensidad del viento, desde Abr/2000 a Mar/2005. Luego los datos de dirección e intensidad del viento en 700 hPa fueron arreglados según los requerimientos de formato del programa del mapa eólico.

### RESULTADOS

A continuación (Figura 3 y Figura 4) se presentan los mapas producidos usando los datos descriptos anteriormente. Para obtener estos mapas en WindMap se deben seleccionar algunas opciones que brinda el programa. El campo de velocidad del viento final se calcula con un campo de viento inicial que se basa en los datos de superficie observados. Estos datos son ponderados con la función de la inversa del cuadrado de la distancia con un radio de 100 m. Todos los datos de superficie se usaron para la inicialización. Para el procedimiento iterativo se mantuvo un residuo máximo de  $10^{-5}$ . El modelo necesita datos para estimar los perfiles verticales en la capa límite atmosférica. Las condiciones atmosféricas utilizadas fueron de un perfil vertical de temperatura estándar con la densidad del aire ajustada por elevación. La altura de la capa límite de superficie se puso en 200 m y no se incluyó la altura de la capa límite de transición. Además la proporción de estabilidad se la puso en 1, es decir, una longitud de Monin-Obukhov de 0 que implica una capa límite neutral.

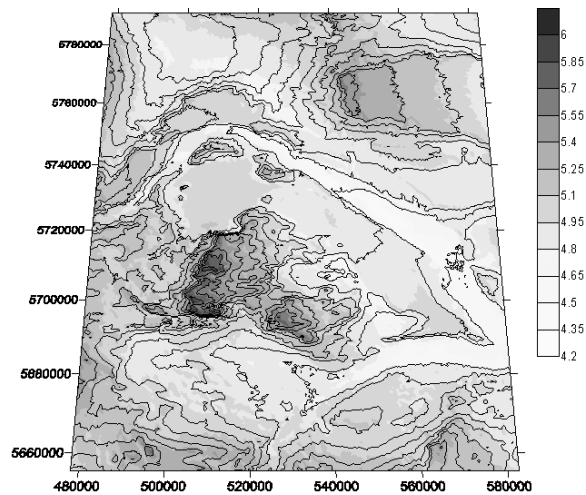


Figura 3: velocidad del viento expresada en m/seg para Departamento Confluencia a 50 m de altura.

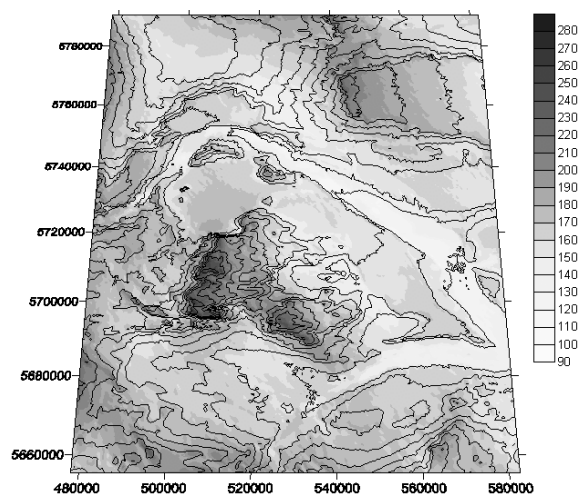


Figura 4: potencia meteorológica disponible expresada en  $W/m^2$  para Departamento Confluencia a 50 m de altura.

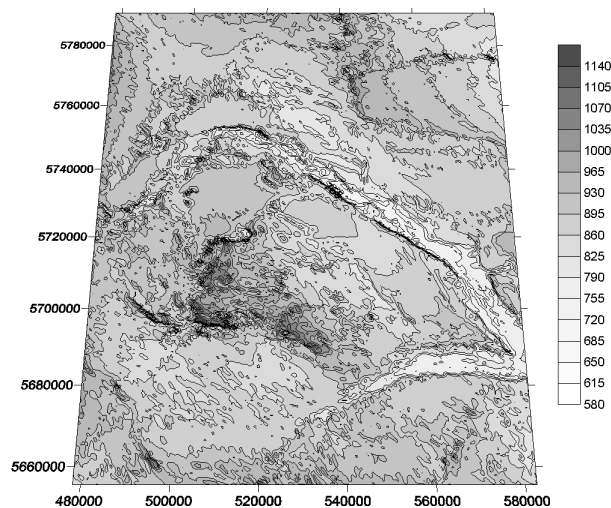


Figura 5: ejemplo de potencia eléctrica obtenible por una turbina NM 750-48 expresada en MWh/año para el Departamento Confluencia.

### ANÁLISIS

Observando la Figura 3, los tipos de viento encontrados son de clase 1 (de 0 a 5.6 m/s), y de clase 2 (de 5.6 a 6.4 m/s).

Las zonas más favorables están ubicadas en el área de Sierra Barrosa, en la zona central del Departamento con velocidades entre 4.2 m/s a 6.1 m/s y potencias meteorológicas disponibles entre 90  $W/m^2$  y 280  $W/m^2$  a

50 m de altura (Figura 4). Valores superiores a 5.0 m/s también se encuentran en la zona de Loma Farías y Cerro El Cordero.

A modo de ejemplo, en la Figura 5 se presentan los resultados de la potencia eléctrica obtenible (Ecuación 1) generada por una turbina NEG-Micon 750-48, cuyo rotor tiene un diámetro de 48.2 m, el área de barrido es de 1824 m<sup>2</sup> y la altura del rotor es de 50 m. El cálculo de la producción de una turbina WindMap lo efectúa en función de la distribución biparamétrica de Weibull que se calculan para cada elemento de la malla y para cada dirección.

$$Pot = \int 0.5 \rho C_p A v^3 \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $C_p$  es el coeficiente de potencia de la máquina,  $A$  es el área de barrido del rotor y  $v$  es la velocidad del viento a la altura del rotor.

## CONCLUSIONES

Se logró por primera vez la evaluación del recurso eólico en una región de la Provincia de Neuquén a través de un SIG que tiene asociado un modelo de capa límite atmosférica (Windmap).

Dado que las mediciones del Aeropuerto Neuquén, del Aeródromo de Cutral – Có y de Agua del Cajón son de períodos largos, los mapas obtenidos pueden considerarse como representativos de los promedios de largo plazo para el Departamento de Confluencia.

El valor de potencia extraíble calculado es interesante como aprovechamiento energético, estando ubicado en cercanías de las líneas de alta tensión del Sistema Interconectado Nacional, quedando además entre los dos valles (río Limay y río Neuquén) y cerca de importantes ciudades para un posible suministro local de energía.

Es de destacar que algunos organismos internacionales de financiación de inversiones, condicionan el otorgamiento de créditos, a la presencia de vientos medios superiores a 6.0 m/s, de hecho en el presente mapa hay lugares que cumplen con este requisito. Con una turbina IEC clase II en dicha zona el factor de capacidad supera el 33% a la altura del rotor de 70 m.

*Agradecimientos.* Agradecemos a DPRH, SMN, LISAMET, a las empresas CAPEX y COPELCO por los datos provistos. Este trabajo es parte de la Tesis de Grado del primer autor. Agradecemos al EPEN la utilización de los datos para la presentación de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Colomb, F.R., Alonso C., Hofmann C. y Nollmann I. (2004), SAC-C mission, an example of international cooperation. *Advances in Space Research*, 34, 10, 2194-2199.
- Labriola C.V.M y Palese C. (2000), Wind energy investments in Argentina. *Wind Engineering*, 24, 6, 443-445.
- Lässig, J.L., Cogliati, M.G., Bastanski, M.A. y Palese, C. (1999), Wind characteristics in Neuquén, North Patagonia, Argentina, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 79, 183-199.
- Palese, C. y Lässig, J.L. (1997), Lago Mari Menuco. Parte I: caracterización del recurso eólico, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1 N°2, 177-180.
- Palese, C. (1999), Vientos intensos en la región norpatagónica, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 3 N° 2, 177-180.
- Palese C., Lässig, J.L., Cogliati M.G. y Bastanski, M.A. (2000), Wind regime and wind power in North Patagonia, Argentina. *Wind Engineering*, 24, 5, 361-377.
- Potts J.R., Pierson S.W., Maticen P.P., Harnel J.R. y Babau V.C. (2001), Wind energy resource assessment of western and central Massachusetts. *Actas American Institute of Aeronautics and Astronautics*, AIAA-2001-0060, 11pp.
- Reese, H.M., Lillesand, T.M., Nagel, D.E., Stewart, J.S., Goldmann, R.A., Simmons, T.E., Chipman, J.W. y Tessar, P.A. (2002), Statewide land cover derived from multiseasonal Landsat TM data. A retrospective of the WISCLAND project. *Remote Sensing of Environment*, 82, 224-237.
- Stull, R. (1988), *An introduction on boundary-layer meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 666 pp.

**ABSTRACT.** The wind energy map of the Confluence Department of the Neuquén province was carried out to evaluate the possible electric power of to extract. The objective was to determinate the most favourable places for the location of future wind farms. The study zone has several high-voltage transmission lines facilitating a connection with the National/Provincial System Interconnected in case of being installed wind farm. This work integrated modern tools of processing data, as a SIG that has included a numerical atmospheric model, WindMap. The geophysical characteristics of the zone were determined through remote sensors, as the topography data, provided by NASA, or the analysis and prosecution of SAC-C satellite images. With these tools the evaluation of the wind power resource was achieved obtaining the maps of the wind field and of available wind power at 50 meters.