

VALORACIÓN ACTUALIZADA DEL POTENCIAL EÓLICO DE NEUQUÉN

S. Troncoso¹, C. Palese

Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400, C.P. 8300, Neuquén, Argentina

Tel. 0299-4490322 – e-mail: samueltroncoso24@gmail.com; claudia.palese@fain.uncoma.edu.ar

Recibido 09/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: Este trabajo tiene como objetivo la actualización del mapa eólico de la Provincia del Neuquén. Con el fin de proveer las bases para futuras tareas de evaluación de potenciales sitios para la instalación de parques eólicos. Se aprovechan nuevos datos de viento de excelente calidad. Se utiliza un modelo tipo diagnóstico que satisface la ecuación de conservación de la masa y que permite manejar múltiples bases de datos. La topografía y la rugosidad superficial se elaboran con datos de sensores remotos. Se obtienen mapas a 50, 80 y 100 m de altura. Se evalúa la calidad de ajuste. Se logran mapas de adecuada calidad especialmente en las direcciones de los Oestes. La Meseta Barda Negra y la Sierra del Portezuelo presentan valores de densidad de potencia media anual a 80 m de altura mayor a 800 W/m² que indica excelente posibilidad de instalación de parques eólicos.

Palabras clave: mapa eólico, modelo de conservación de la masa, densidad de potencia, recurso eólico.

INTRODUCCION

El mapeo eólico es un tipo de cartografía que proporciona una base para una estratégica toma de decisiones relacionadas a la distribución del recurso eólico y su eficaz aprovechamiento. La cuantificación del recurso posibilita avanzar en los estudios de factibilidad de proyectos para aplicaciones que incluyen la generación de energía eléctrica a escala comercial, en sistemas conectados a la red y de menor escala en sistemas aislados.

Ejemplo de mapas del potencial eólico son: de Argentina <https://sigeolico.minem.gob.ar/>, del Neuquén (Palese y otros, 2011), de Mendoza (Hualpa y Milani, 2007), de Misiones (Aires y otros, 2012) y de Río Negro (Guozden y otros, 2018).

El objetivo de este trabajo es actualizar una parte del mapa del potencial eólico de la Provincia del Neuquén. El estudio se desarrolla en el marco de un Convenio suscripto entre la Agencia de Desarrollo de Inversiones del Neuquén Sociedad del Estado de la Provincia (ADI-NQN SEP) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue.

La Agencia mencionada fijó la zona de interés, que se muestra en el Figura 4 y que tiene 600.000 habitantes, aproximadamente, abarca 42.390 km² y cuenta con líneas de transporte de energía eléctrica de media y alta tensión correspondientes al Sistema Argentino de Interconexión (SADI). Para lograr el objetivo planteado se utilizaron datos medidos de vientos obtenidos del Plan Eólico de la ADI-NQN SEP.

La actualización del mapa eólico permitirá contar con una herramienta básica para la elaboración de planes de desarrollo del recurso eólico, facilitar el análisis técnico económico de las distintas alternativas de abastecimiento energético, constituyéndose en un soporte para la toma de decisiones, identificar áreas potencialmente aptas para el desarrollo de proyectos y el diseño de estudios o programas de evaluación del recurso en sitios específicos.

¹ Trabajo final de la carrera de Ingeniería Eléctrica –UNComa-

METODOLOGIA

La valoración del recurso eólico se realiza con un modelo numérico de simulación atmosférica que incorpora un sistema de información geográfica. El modelo satisface la ecuación de conservación de la masa y calcula el campo de velocidad del viento (*Vector V**) que se desvía la mínima cantidad posible de un campo de viento inicial derivado de datos observados (*Vector V*). El ajuste necesario para lograr cero divergencia (Ec. (2)) 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.

Si se denominan $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$ a las componentes de velocidad de Oeste a Este, de Sur a Norte y hacia arriba, el modelo propone un *vector V** = ($u^*(x, y, z)$; $v^*(x, y, z)$; $w^*(x, y, z)$) que minimiza el *funcional J* definido como:

$$J = \iiint_V [\alpha_1 (u^* - u)^2 + \alpha_2 (v^* - v)^2 + \alpha_3 (w^* - w)^2] dx dy dz \quad (1)$$

Restringido a:

$$\text{div}V^* = \frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

En el cual $V = (u(x, y, z); v(x, y, z); w(x, y, z))$ es el campo de viento medido; α_i son módulos de precisión. Para tener en cuenta la estratificación atmosférica y la desviación respecto a las condiciones de estabilidad neutra se afecta la ecuación de trabajo con coeficientes de corrección.

El procedimiento utiliza aproximaciones matemáticas para resolver el campo de velocidades sin la necesidad de utilizar ecuaciones de transporte como las ecuaciones de Navier-Stokes. El resultado de este modelo es adecuado y requiere un menor esfuerzo computacional y se muestra a través de mapas de la distribución sobre el terreno del viento y de la densidad de potencia eólica a distintos niveles de altura sobre el nivel del suelo.

Como la orografía, el resguardo producido por obstáculos y la rugosidad superficial del terreno son, entre otros, factores que afectan el viento, el modelo utiliza mapas digitales de topografía y de rugosidad superficial conjuntamente con datos de viento medidos. En la Figura 1 se muestra en forma de diagrama los pasos metodológicos seguidos en este trabajo y a continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

Dominio de análisis

El dominio abarca el área comprendida entre 37 ° 55 ' S - 40 ° 36 ' S en la dirección norte - sur y 67 ° 58 ' O - 71 ° 09 ' O en la dirección este - oeste (sombreado azul en la Figura 4). La malla tiene 638 nodos en el "eje x", 700 nodos en el "eje y" y 15 niveles de altura en el eje σ (eje vertical conforme al terreno). La resolución espacial horizontal es de 423 metros. El dominio abarca y excede el área de interés de la ADI-NQN SEP (sombreado verde en la Figura 4).

Mapa digital de topografía

Los datos orográficos se descargaron del sitio web del Servicio Geológico U.S. Geological Survey y tienen una resolución espacial horizontal de un segundo de arco. Por medio de una transformación se rectificaron a la resolución y dimensiones del dominio de análisis. En la Figura 2 se muestra el modelo digital de elevación utilizado. El sistema de referencia es Gauss-Krüger Argentina.

Mapa digital de rugosidad aerodinámica superficial media anual

Para su obtención se usa una metodología indirecta basada en datos satelitales de los canales reflectivos del sensor ETM+/Landsat7. A cada uso/cobertura del suelo en que fue clasificada la escena satelital se lo asocia con un valor de rugosidad aerodinámica superficial (z_0) según Spera (1999) y Stull (1988). La Tabla 1 describe en la característica uso/cobertura del suelo y el valor z_0

asignado. El resultado se observa en la Figura 3 que muestra los valores medios anuales.

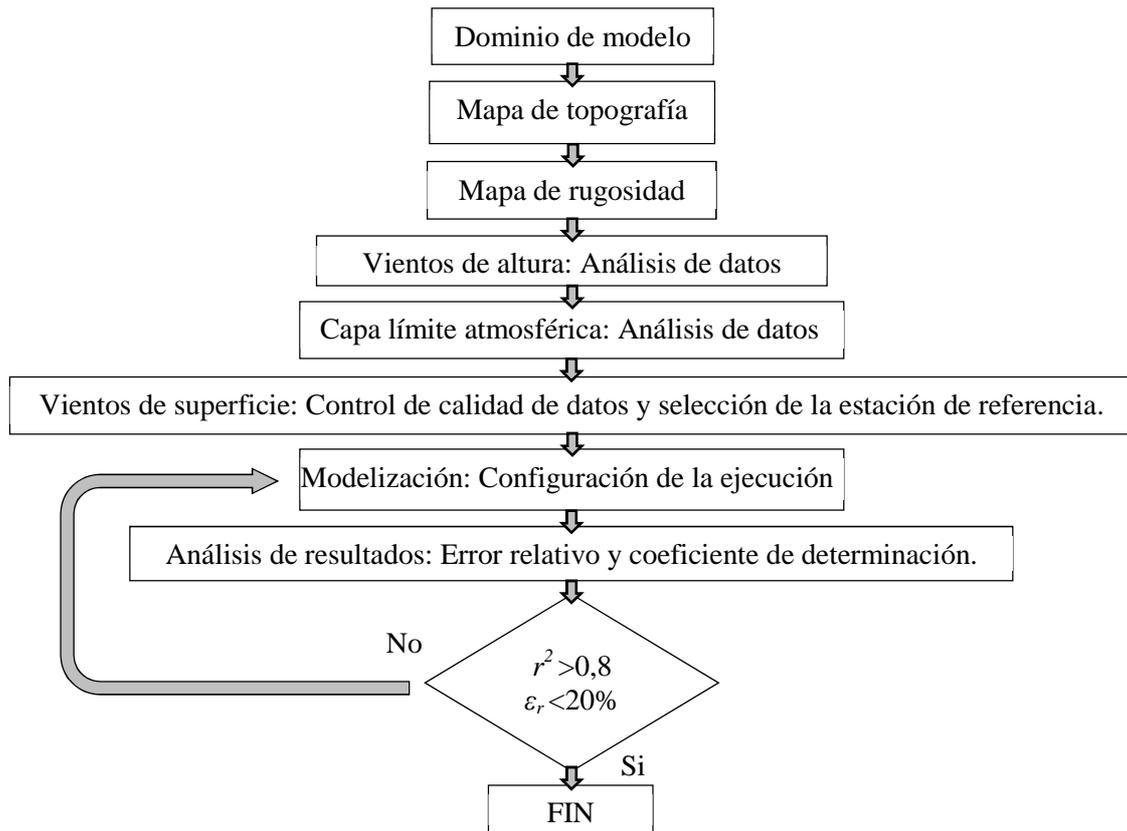


Figura 1: Diagrama de flujo que resume la metodología utilizada.

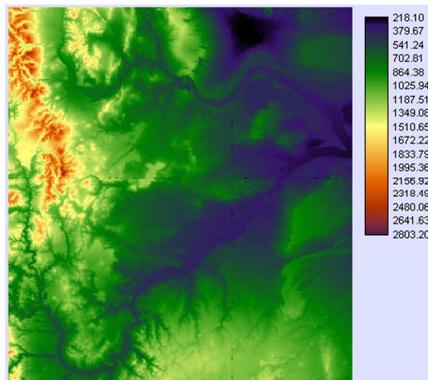


Figura 2: Mapa digital de la topografía con elevaciones expresadas en m.s.n.m..

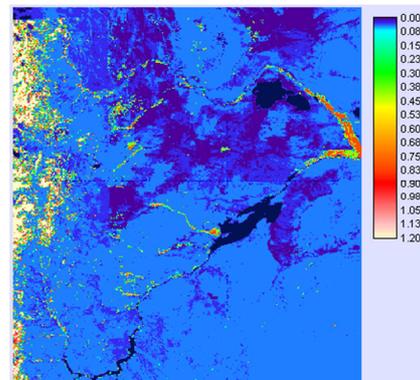


Figura 3: Mapa digital de z_0 media anual expresada en metros.

Descripción	z_0 [m]
Agua	0,0009
Suelo desnudo	0,005
Vegetación herbácea baja y dispersa	0,05
Ciudad	0,4
Bosque caducifolio	0,8
Bosque perenne	1,2

Tabla 1: Rugosidad aerodinámica superficial, z_0 , correspondientes al mapa de la Figura 3.

Datos de viento de altura

La velocidad y la dirección del viento geostrófico se descargaron del Global Data Assimilation System (GDAS/NOAA). Corresponden a datos derivados de un modelo atmosférico. Se utilizó un período de 5 años (2000 – 2004). Los datos de viento son estimaciones cada 6 horas que corresponden a la

velocidad y dirección del viento a 810 m, 1.510 m y 3.090 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Estos datos son de una posición central y válidos para todo el dominio. Esta posición está indicada mediante un marcador color turquesa en la Figura 4.

	810 m.s.n.m.	1.510 m.s.n.m.	3.090 m.s.n.m.
Dirección más frecuente (frecuencia)	240 ° (25,7 %)	270 ° (25,8 %)	270 ° (31,6 %)
Velocidad media anual	5,8 m/s	9,6 m/s	12,8 m/s
Vientos más fuertes (dirección)	7,4 m/s (270°)	12,2 m/s (270°)	15,2 m/s (270°)

Tabla 2: Características de los vientos de altura en la región de estudio.

Como se observa en la Tabla 2 los vientos más frecuentes son del sudoeste (240°) en el nivel más bajo y rotan al oeste (270°) en los niveles superiores. El incremento vertical de la intensidad del viento, en promedio, es 0,004 (m/s)/m, este dato se utiliza en las interpolaciones verticales del modelo. En el análisis direccional los vientos más intensos son los oestes cuyas velocidades varían entre 7,4 y 15,2 m/s en las tres alturas.

Datos de la capa límite atmosférica

De acuerdo al tipo de estabilidad, el modelo estima los perfiles verticales del viento en la subcapa superficial de la capa límite atmosférica. Ésta estabilidad se indica con la longitud de Monin-Obukhov, L , que depende de la velocidad del viento, la rugosidad superficial y del flujo de calor.

La altura de la capa límite atmosférica, la altura de la subcapa de superficie y la longitud L en este trabajo se determinan como un promedio anual para la posición central del dominio (marcador color turquesa en la Figura 4).

Con los datos del sistema GDAS/NOAA se obtiene que la altura de la capa límite atmosférica está a 663 metros sobre el nivel del suelo (m.s.n.s.), la altura de la subcapa de superficie a 170 m.s.n.s., la estabilidad atmosférica más frecuente, en el 57% del año, es la del tipo neutral ($L \gg 200$ metros), el 33% es estable y el 10% es inestable.

Datos de viento de superficie

Para representar adecuadamente las características del flujo a través de la región analizada es importante tener una red de estaciones de medición densa, por ello, en este trabajo no sólo se utilizaron los datos proporcionados por la ADI-NQN SEP, que brindan actualidad de la información, sino también aquellos incluidos en la elaboración del mapa del potencial eólico provincial anterior.

Se ha tenido cuidado en la exactitud de los datos, por ello, se realiza un estricto control de calidad de las bases de datos medidos de velocidad (V) y de dirección (D) con el objetivo de identificar todo aquel registro incorrecto. Esta tarea incluyó el re-análisis de las bases de datos utilizadas con anterioridad y el análisis de las nuevas, con los siguientes criterios:

- Rango de validez de las velocidades, $0 \text{ m/s} \leq V \leq 52 \text{ m/s}$,
- Rango de validez de las direcciones, $0^\circ \leq D < 360^\circ$,
- Verificación de D cuando $V = 0 \text{ m/s}$,
- Persistencia de un valor de V o Calma ($V = 0 \text{ m/s}$) por periodos prolongados,
- Persistencia de un valor de D por periodos prolongados,
- Corrección por interferencia de la torre según metodología sugerida en Mattio y Tilca (2009) en las cinco estaciones de la ADI-NQN S.E.P.,
- Análisis estadístico y su comparación con las características eólicas de la región.

Cuando se detectó un error se eliminó el registro completo.

En la Figura 4 (marcadores con letras) se señalan las posiciones y en la Tabla 3 se muestra la disponibilidad de datos e información de cada una de las torres de medición. Se destacan las bases de datos de los Aeropuertos Neuquén y Chapelco (E y K) debido a los periodos prolongados de 31 y 21 años, respectivamente. Por otra parte, las últimas cinco (N a R) se distinguen por las mediciones a

varios niveles de altura.

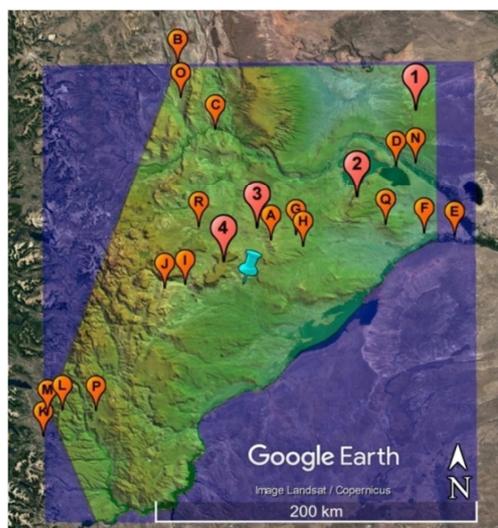


Figura 4: Dominio completo del modelo (sombreado azul) y región de interés de la ADI-NQN S.E.P. (sombreado verde). Los marcadores con letras indican la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas. Marcador color turquesa: posición correspondiente a los datos de viento de la atmósfera superior y de la capa límite atmosférica. Los marcadores con números muestran los lugares con buenos niveles de densidad de potencia ($DP \geq 500 \text{ W/m}^2$) cuya descripción está en la Tabla 7.

	Elevación [m.s.n.m.]	Altura [m.s.n.s.]	Periodo [años]	Frecuencia [min]	Tasa de datos útiles [%]	Fuente
A	946	30	1,5	60	69,01	COPELCO
B	1.189	10; 30	3,6	10	99,83; 99,93	EPEN
C	593	10	2/3	10	98,41	EPEN
D	415	4	5/6	15	93,36	L DFA
E	272	10	31	60	71,35	SMN
F	307	2,5	2 1/6	10	97,85	CAPEX
G	659	10	5,3	180	45,16	SPRH
H	701	35	2 1/6	60	85,95	COPELCO
I	811	10	1,75	60	93,88	EPEN
J	852	18	1 1/3	60	92,35	EPEN
K	789	10	21	60	35,57	SMN
L	1.073	26	1	10	97,53	EPEN
M	784	10	9,4	1.440	92,2	EPET N°4
N	286	40; 60; 80	1 2/3	10	94,49; 94,49; 94,49	ADI-NQN
O	868	40; 60; 80; 82	2	10	97,08; 97,03; 97,03; 95,97	ADI-NQN
P	999	40; 60; 80; 82	1	10	100; 100; 94,2; 100	ADI-NQN
Q	696	40; 60; 84	2	10	99,05; 99,06; 95,7	ADI-NQN
R	1.033	20; 40; 60	2	10	99,8; 99,87; 99,73	ADI-NQN

Tabla 3: Estaciones meteorológicas utilizadas. Se detallan las referencias de la Figura 4, elevación respecto del nivel del mar, altura de los sensores respecto del nivel del suelo, periodo de medición, frecuencia de medición, tasa de datos útiles y la Institución que brindó la información. COPELCO:

Cooperativa Eléctrica de Cutral Có, EPEN: Ente Provincial de Energía del Neuquén, L DFA: Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales (FI-UNCOMA), SMN: Servicio Meteorológico Nacional, CAPEX: Central Térmica Capex, SPRH: Secretaría Provincial de Recursos Hídricos del Neuquén, EPET: Escuela Provincial de Enseñanza Técnica, ADI-NQN S.E.P.: Agencia de Desarrollo de Inversiones del Neuquén.

Estación meteorológica de referencia

La estación de referencia define las frecuencias de ocurrencia para cada sector de dirección y por lo tanto, las medidas que el modelo utiliza para promediar el campo de viento final. Como se la utiliza para todo el dominio debe ser representativa. Para su selección se usaron los siguientes criterios:

- ✓ Distribución de frecuencia de la dirección representativa del clima eólico del dominio,
- ✓ Mediciones a alta frecuencia (≤ 10 minutos), las 24 horas del día y en un periodo prolongado (≥ 2 años),
- ✓ Con mediciones de buena calidad, con sensores calibrados y homologados,
- ✓ Ubicación centrada en el dominio, bien expuesta al clima eólico local (no en valle o en colina y sin obstáculos cercanos).

Bajo los criterios arriba mencionados se seleccionó la estación de Subida del Capo a 40 m (R en Figura 4 y Tabla 3) cuyos vientos predominantes provienen de las direcciones oeste y oeste-noroeste (Figura 5 (izq.)), que suman una ocurrencia de 42 % del año. También los vientos de estas direcciones son los más fuertes, del oeste (270°) a 9,62 m/s y del oeste-noroeste (300°) a 10,08 m/s, como se observa en la Figura 5 (der.).

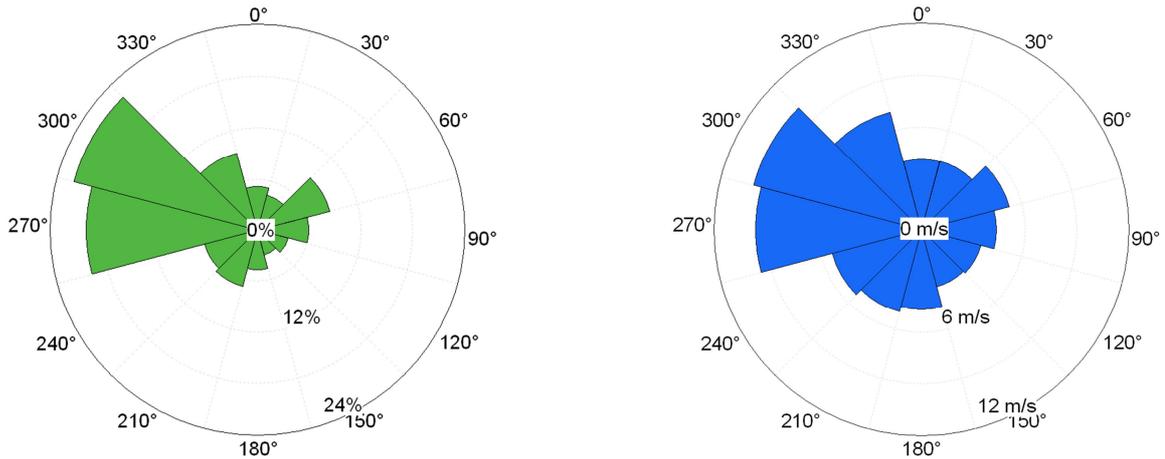


Figura 5: Estación meteorológica de referencia Subida del Capo a 40 m.s.n.s. (R en Figura 4) (izq.) Distribución de frecuencias de la dirección del viento. (der.) Distribución de velocidades medias por dirección.

Caracterización del recurso eólico

Se realiza mediante la determinación de la función de densidad de probabilidad de la velocidad del viento y de la densidad de potencia eólica.

La función de densidad de probabilidad de Weibull, $f(v)$, es:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3)$$

donde, v es la velocidad del viento, k es el parámetro de forma y c es el parámetro de escala. En la Figura 6 (izq.) se grafican las $f(v)$ de cuatro direcciones del viento de la estación meteorológica de referencia y se incluyen los parámetros de forma, de escala y la velocidad media anual por dirección. Cuando los vientos provienen de las direcciones norte, este y sur tienen, en promedio, alta frecuencia de ocurrencia las velocidades mayores a 2,0 m/s y menores e iguales a 4,0 m/s; cuando provienen del oeste la mayor ocurrencia es de vientos con velocidades mayores a 7,0 m/s y menores e iguales a 8,0 m/s.

La densidad de potencia eólica, DP , depende de la velocidad del viento, v_i , de la densidad del aire, ρ , y de la función de probabilidad de la velocidad del viento, $f(v_i)$, de la forma:

$$DP = \frac{P}{A} = \sum \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_i^3 \cdot f(v_i) \quad (4)$$

La Figura 6 (der.) presenta la DP de la estación meteorológica de referencia. Se observa que las velocidades mayores a 12,0 m/s y menores e iguales a 14,0 m/s muestran la más alta DP , 35 W/m². El valor total del período anual es 488,88 W/m².

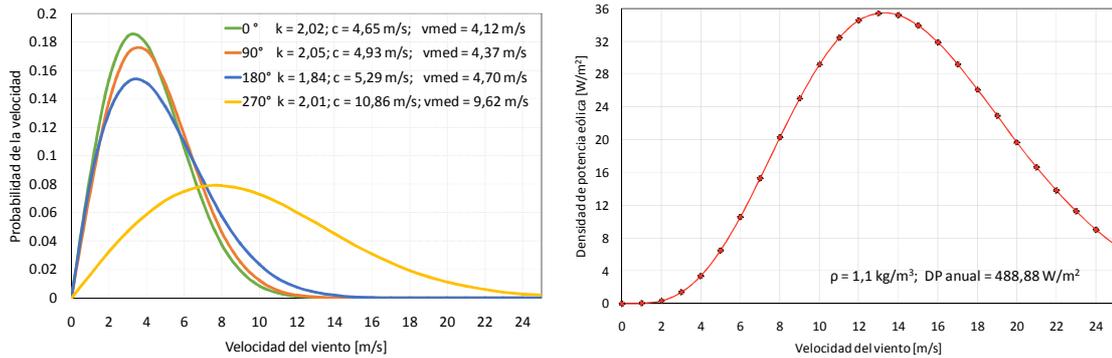


Figura 6: Estación meteorológica de referencia Subida del Capo a 40 m.s.n.s. (R en Figura 4) (izq.) Distribución de probabilidad de la velocidad del viento media anual en las direcciones norte (0°), este (90°), sur (180°) y oeste (270°). (der.) Distribución de la densidad de potencia eólica según la velocidad del viento, V_i .

Configuración inicial del modelo

Se fijó un intervalo de clase de 30° para la dirección del viento, de este modo los cálculos se determinan en 12 sectores de dirección.

Se estableció que la densidad del aire se ajuste por la elevación utilizando el perfil vertical estándar de la temperatura del aire.

Se determinó que la inicialización se efectúe con los datos de vientos de superficie con un radio de representatividad de las mediciones de 500 m.

Se exigió que el proceso iterativo finalice cuando se tenga un máximo residuo en la divergencia del campo de velocidades de 1×10^{-5} 1/s o se lleguen a las 100.000 iteraciones.

Para lograr mejores resultados se pidió que coincidan los datos de superficie con una tolerancia de 5% y que optimice la relación de estabilidad atmosférica con tolerancia de 5%.

Evaluación de la precisión de los resultados

Se efectúa mediante el cálculo direccional del error relativo porcentual, ε_r , y del coeficiente de determinación, r^2 , entre las velocidades medidas y las que resultaron de la simulación. Se consideran que los resultados son representativos si $\varepsilon_r \leq 20\%$ en la estimación de la velocidad media general y $\varepsilon_r \leq 10\%$ en las velocidades medias de las direcciones más frecuentes y energéticas. Además, debe ser $r^2 \geq 0,80$.

Se realizan varias simulaciones con cambios en la configuración e inicialización del modelo. De cada una de ellas se evalúa la concordancia entre los resultados y los datos medidos con los cálculos de ε_r y r^2 en cada uno de los 12 sectores de dirección del viento. Luego, se establece de cada simulación la frecuencia en que se produjeron bajos errores, $\varepsilon_r \leq 1\%$, y altos errores, $\varepsilon_r \geq 10\%$. Se escoge la ejecución que presenta más veces errores de bajo valor, menos veces de alto valor y alto coeficiente de determinación.

La validación de los resultados se realiza con una simulación sin incorporar en la inicialización del modelo ni en la ejecución final los datos de velocidad y dirección de una estación de medición, a la que llamamos *Estación Testigo*. La finalidad es comparar las velocidades medidas con los valores hallados en su posición. La medición en Cerro Bandera, que tiene la etiqueta A en la Figura 4, fue seleccionada como *Estación Testigo* dada su posición casi central en el dominio. Como las mediciones son a 30 m.s.n.s. se efectúa una nueva ejecución a esta altura. Una vez obtenidos los valores direccionales de velocidad en la posición se calculan los coeficientes de determinación y de correlación para medir la bondad del resultado.

Datos de salida

Los resultados del modelo son de dos tipos: uno consiste en una matriz de datos que contiene, de la totalidad de los nodos de la malla y por cada par coordenado, la velocidad media anual, v , la densidad de potencia media anual, DP , y de cada uno de los 12 sectores del viento, la frecuencia, la velocidad media y el parámetro de forma, k , de la función de Weibull, $f(v)$, d . Por otro lado, también se obtienen los mapas digitales con la distribución de la velocidad y la densidad de potencia de la región.

Estos resultados corresponden a 50, 80 y 100 metros de altura. Esta elección se fundamentó en que el nivel de 50 m se utilice para la comparación con el mapa del potencial eólico provincial existente, el nivel de 80 m para compararlo con el mapa elaborado por AWS Truepower (2015), y el de 100 m porque es la altura que se analiza para la instalación de aerogeneradores de gran potencia.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Precisión lograda

Se realizan 9 simulaciones logrando un buen ajuste en la de mejor precisión, $r^2 = 0,88$, considerando todas las mediciones y todas las direcciones del viento. Además, en las direcciones más frecuentes (los Oestes) es $r^2 > 0,97$.

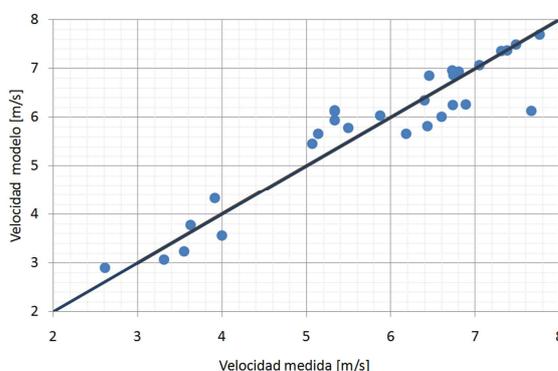


Figura 7: Velocidad modelada vs medida de cada estación (todas las direcciones) y recta identidad.

La Figura 7 muestra el ajuste alcanzado entre los datos de velocidad simulada por el modelo versus los datos medidos de cada estación (todas las direcciones). En ella se observa que hay más valores por arriba de la recta de identidad que por debajo indicando que la simulación sobreestima las mediciones. El valor más distante a la recta identidad corresponde a la torre de medición ubicada en Junín de los Andes (marcador L en la Figura 4 y la Tabla 3). Esta diferencia en la velocidad media anual no se observa cuando se hace el análisis detallado por dirección. Los errores direccionales en este sitio varían entre 0,23 % y 9,25 %, este último en la dirección sur debido al efecto topográfico.

El valor absoluto del error relativo porcentual entre las velocidades medias medida y simulada es menor a 7 %. En la Figura 8 (a) se observa que hay variación entre 0,11 % en Subida del Capo (R60m) y 20,06 % en Junín de los Andes (L26m). En las direcciones más frecuentes (210° a 270°) los errores individuales por estación de medición no superan 12 % (figura no mostrada) y los errores generales promedio de todas las estaciones son inferiores a 3,2 % (Figura 8 (b)).

Precisión lograda en la Estación Testigo

La Figura 9 muestra el ajuste alcanzado entre las velocidades simulada y medida en la posición de la Estación Testigo (A: Co. Bandera 30 m.s.n.s.) según las direcciones del viento. El coeficiente de correlación es 93,6 % y $r^2 = 0,875$. La simulación sobreestima las mediciones, sin embargo, la simulación representa adecuadamente el clima eólico local. Las diferencias, en promedio, entre los resultados del modelo en esa ubicación y las mediciones son más grandes (1,3 m/s) que las obtenidas cuando la estación es incluida en la simulación (0,1 m/s). El principal factor en este hecho se debe a que las mediciones corresponden a una ubicación puntual mientras que la velocidad simulada por el modelo representa un área de 423 m x 423 m (178929 m²). Además, hay una incertidumbre relacionada con la posición geográfica de la Estación Testigo y su exacta posición en el mapa del potencial eólico hallado.

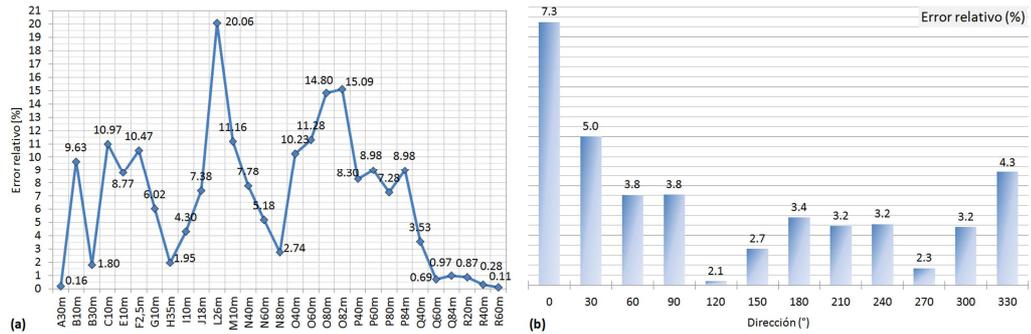


Figura 8: Errores relativos porcentuales(a) por lugar de medición; (b) por dirección del viento.

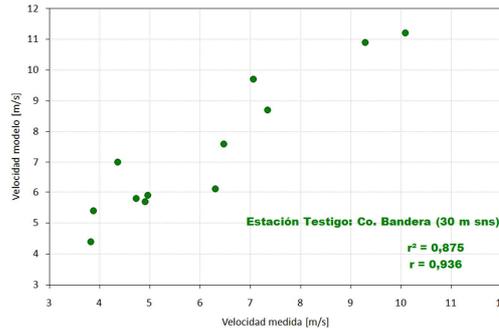


Figura 9: Velocidad medida vs velocidad modelada en la posición de la Estación Testigo que no fue incluida en ninguna etapa de la simulación.

Mapas de viento

En la Figura 10 se muestra el resultado del mapa de la velocidad media anual a 80 m.s.n.s. del área de interés. Los mapas a 50 y 100 m presentan características similares, por lo que no son mostrados en este manuscrito.

Altura sobre el nivel del suelo [m]	Velocidad media anual [m/s] (Densidad de potencia media anual [W/m ²])	
	Mínima	Máxima
50	3,38 (60,00)	12,78 (4050,35)
80	3,69 (89,94)	13,46 (4446,96)
100	3,80 (93,45)	13,81 (4622,52)

Tabla 4: Valores mínimos y máximos de velocidad media anual y entre paréntesis de la densidad de potencia media anual, simulados a 50, 80 y 100 m.s.n.s..

Rangos de velocidad [m/s]	(0 - 5]	(5 - 6]	(6 - 7]	(7 - 8]	(8 - 9]	(9 - 14]
Porcentaje de la superficie total [%]	8,9	28,0	35,6	19,9	6,2	1,3

Tabla 5: Porcentaje de superficie que ocupa cada rango de velocidades en el mapa a 80 m.s.n.s..

La Tabla 4 exhibe los valores mínimos y máximos de la velocidad media anual que hay en cada uno de los mapas simulados. Las posiciones donde se producen estos extremos coinciden en los tres niveles. La Tabla 5 detalla el porcentaje de superficie de cada rango de velocidades a 80 m.s.n.s.. Se observa que 84 % de la superficie tiene velocidades entre $5,0 \text{ m/s} < V \leq 8,0 \text{ m/s}$.

Mapas de densidad de potencia eólica

En la distribución de la densidad de potencia media anual a 80 m.s.n.s. de la Figura 11 se observan valores menores a 200 W/m^2 en los terrenos bajos como la Cuenca del Añelo en el norte del dominio y valores mayores a 2000 W/m^2 en áreas altas como las correspondientes a las Sierras de Chachil y de Catán Lil en el centro-oeste del dominio. Los mapas a 50 y 100 m.s.n.s. tienen características similares. Los valores extremos en cada altura de la simulación están incluidos entre paréntesis en la Tabla 4.

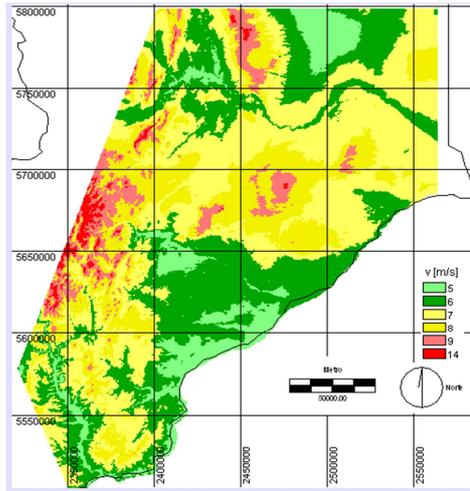


Figura 10: Mapa de la velocidad media anual a 80 m.s.n.s..

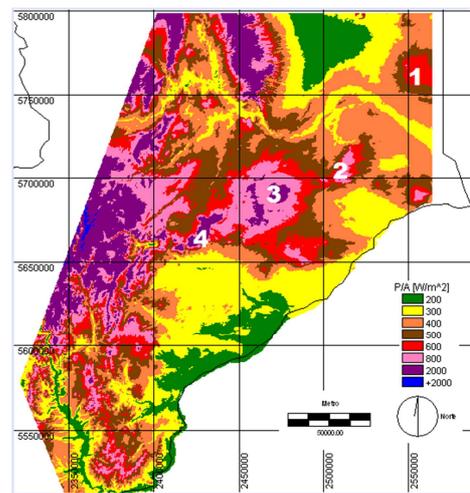


Figura 11: Mapa de la densidad de potencia anual a 80 m.s.n.s.. 1 - Sierra Piedra Blanca; 2 - Sierra Barrosa; 3 - Sierra del Portezuelo; 4 - Meseta Barda Negra.

La Tabla 6 señala el porcentaje de superficie respecto del área total estudiada de cada clase de densidad de potencia a 80 m.s.n.s.. Se observa que 26,3 % de la superficie tiene densidad de potencia eólica cuya viabilidad es buena o mayor (clases 4 a 7).

Clase	Viabilidad	Velocidad del viento [m/s]	Densidad de Potencia [W/m ²]	Porcentaje de superficie [%]	Superficie [km ²]
1	Nula	0 - 5,9	0 - 250	21,1	9.057
2	Mala	5,9 - 6,8	250 - 350	23,0	9.851
3	Marginal	6,8 - 7,5	350 - 500	24,8	10.615
4	Buena	7,5 - 8,0	500 - 600	10,2	4.351
5	Muy buena	8,0 - 8,6	600 - 750	9,3	3.969
6	Excelente	8,9 - 9,4	750 - 1.000	6,9	2.970
7	Excepcional	> 9,4	> 1.000	4,8	2.041
			TOTAL	100,0	42.854

Tabla 6: Clases estándar de densidad de potencia eólica a 80 m.s.n.s. y superficie que ocupa cada una.

DISCUSIÓN

Los valores de la Tabla 6 son interesantes como aprovechamiento energético cuando se trata de áreas que se encuentran en una región concentrada y en cercanías de las líneas de transmisión eléctrica de

media o alta tensión del SADI. Otro factor importante es la proximidad a las rutas. En la Tabla 7 se clasifican las regiones mencionadas en la Figura 11 y se evalúa el rango de densidad de potencia, el área que representa, la distancia a la línea de transmisión de energía eléctrica y la distancia a la ruta. Se observa en el mapa de la Figura 11 que las áreas de la Meseta Barda Negra y de la Sierra del Portezuelo presentan los mejores promedios anuales de densidad de potencia eólica, con valores superan 800 W/m^2 , sin embargo, la última de éstas es la que tiene menor distancia a la línea de transmisión y a la ruta y por lo tanto, más conveniente para la instalación de un parque eólico. También presenta características muy buenas del recurso eólico la zona de la Sierra Barrosa, $DP > 600 \text{ W/m}^2$. La Sierra Piedra Blanca exhibe valores $DP > 500 \text{ W/m}^2$, siendo esta última de menor recurso pero de mejor accesibilidad.

Nº	Lugar	DP [W/m^2]	Área [km^2]	Distancia a línea [km]	Tensión de la línea [kV]	Distancia a Ruta [km]
1	Sierra Piedra Blanca	500 - 550	310	2,0	500	2,00
2	Sierra Barrosa	500 - 750	147	34,2	500	21,50
3	Sierra del Portezuelo	600 - 900	187	6,0	132	6,55
4	Meseta Barda Negra	900 - 1.000	159	20,0	132	14,00

Tabla 7: Lugares de viabilidad buena a excelente y distancia de los mismos a líneas eléctricas y rutas.

Los resultados de este trabajo se comparan con otras valoraciones disponibles del recurso eólico de la provincia del Neuquén que se muestran en la Tabla 8. Con el resultado obtenido a 50 m.s.n.s. se realiza la comparación con el Mapa del año 2006 (Palese y otros, 2011). Para ello se localizan en ambos mapas 6 lugares (no se muestran en este manuscrito) y se calcula el coeficiente de correlación entre las velocidades. El resultado da bajo coeficiente $r = 59 \%$ ($r^2 = 0,3506$). Los resultados obtenidos a 80 m.s.n.s. se comparan con el mapa del año 2015 (AWS Truepower, 2015). En este caso se seleccionan 8 lugares (no se muestran en este manuscrito), el coeficiente es $r = 94 \%$ ($r^2 = 0,88$). Las diferencias encontradas pueden deberse principalmente a las distintas resoluciones espaciales que tienen los mapas (ver Tabla 8), al tipo de dato utilizado en la inicialización del modelo y el período de los mismos. Por otra parte, la densidad de información es distinta en los tres mapas.

Mapa	Resolución espacial	Datos utilizados
Actualización Mapeo provincial (- 2018 - este trabajo)	423 m	Mediciones hasta 2016
Mapeo provincial - 2006 -	1.200 m	Mediciones hasta 2005
Wind Resource of Argentina - 2015 -	200 m	Derivados de modelos atmosféricos

Tabla 8: Características de las fuentes de información del recurso eólico en la Provincia del Neuquén utilizadas en la comparación de los resultados de este trabajo.

CONCLUSIONES

Los datos de viento utilizados provienen de torres de medición con sensores de calidad y en la mayoría de los casos hay más de 80 % de disponibilidad de los mismos. Hay mediciones de largo plazo con registros mayores a 20 años y de nuevas estaciones meteorológicas homologadas con sensores de tecnología actual. El análisis estadístico de los datos de viento muestra que éstos representan adecuadamente las características del viento de la región.

La simulación lograda sobreestima las intensidades del viento medido, sin embargo, el valor absoluto del error relativo general es 6,89 % y los oestes no superan 4 %. Las velocidades resultantes del modelado se ajustan bien a las velocidades medidas, el coeficiente de correlación general es 93 % y en los vientos del oeste se logra 98 %. La mejor precisión obtenida es en Senillosa (etiqueta Q Figura 4). La validación de los resultados efectuada comparando los valores medidos y los modelados de la *Estación Testigo* seleccionada es apropiada.

Se logran mapas del potencial eólico de la Provincia del Neuquén a 50, 80 y 100 m.s.n.s. de adecuada calidad. Los valores mínimo y máximo de velocidad se ubican en la misma zona en las tres alturas. Este hecho es provocado por la fuerte influencia que tiene la topografía en la velocidad del viento dentro de la capa límite atmosférica. El mínimo se produce en una zona resguardada por una barda

(escalón de la meseta) cerca del pueblo Los Molles y el máximo en el Cerro Chachil que tiene 2.831 m.s.n.m..

Los lugares con mejores promedios anuales de densidad de potencia que disponen del acceso a líneas de transporte de energía eléctrica del SADI y a rutas son dos. Uno es en Sierra del Portezuelo con excelentes valores de densidad de potencia y una línea de 132 kV a 6 km de distancia. El segundo, con valores menores de densidad de potencia, pero aún buenos, es en Sierra Piedra Blanca que tiene una línea de 500 kV a 2 km de distancia.

Organismos internacionales de financiación consideran las áreas de recurso eólico Clase 4 o mayores adecuadas para el desarrollo de energía eólica a escala comercial, éstas representan 31,1 % de la superficie analizada.

Esta actualización de la valoración del recurso eólico mejora en 3 veces la resolución espacial horizontal (423 metros) respecto al mapa del potencial eólico provincial existente que es de 1.200. Además, se mejora la calidad de $\varepsilon_r = 13,5$ % del mapa anterior (Palese y otros, 2011) a $\varepsilon_r = 6,89$ % en esta valoración.

Agradecimientos. A la ADI-NQN S.E.P. por los datos brindados. Este trabajo se realizó con fondos de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Comahue subsidio PI04/I227.

REFERENCIAS

- Aires M., De Bortoli M.E., Frigerio E., y Roko S.R. (2012). Estimación del potencial eólico de la provincia de Misiones. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 06.09 – 06.16.
- AWS Truepower (2015). Wind Resource of Argentina. aws-dewi.ul.com, última consulta 30/07/2018.
- Guozden, T.M., Bianchi E., Solarte A., y Mulleady C. (2018). Evaluación de Recursos Eólicos en la Provincia de Río Negro (Patagonia Argentina) usando Merra Reanalysis. *Meteorológica*. En edición.
- Hualpa, F. y Milani F. (2007). Mapa eólico de la Provincia de Mendoza. Informe Técnico Proyecto J-046, Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, 60 pág.
- Mattio H. F. (2003). *Nociones Generales de Energía Eólica*. Libro digital.
- Mattio H. F. y Tilca, F. (2009). Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica, y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores. CREE, INENCO, Ministerio de Planificación Federal Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Energía de la Nación.
- Palese C., Mattio H., Pedro G., Warchomicka N. y Lassig J. (2011). Mapa eólico de la Provincia del Neuquén, *Revista HIDRORED Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía*, 2, 3-11.
- Spera, D. A. (1994). *Wind Turbine Technology*, 393 pág. New York: ASME Press.
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.

ABSTRACT

The objective of this work is to update the wind resource map of the Province of Neuquén to provide the basis for future evaluation tasks of potential sites for the installation of wind farms. New wind data of excellent quality are used. A diagnostic mass consistent model that allows managing multiple databases is used. The topography and the surface roughness were elaborated with remote sensors data. Wind resource maps were obtained at 50, 80 and 100 m above ground level. The quality of results was evaluated. Maps of adequate quality have been obtained especially in the west directions. The Barda Negra Plateau and the Sierra del Portezuelo have yearly average wind power densities at 80 m above ground level in excess of 800 W/m^2 , which indicates excellent resource for installing wind farms.

Keywords: wind map, mass consistent model, wind power density, wind power resource.