

Análisis Climático de la Velocidad del Viento en la Región Sur del Ecuador

Álvarez O.*; Maldonado J.**; Montaña T.***; Tenechagua L.***

*Universidad Nacional de Loja, Proyecto "Prometeo, Viejos Sabios" SENESCYT, Loja, Ecuador
e-mail: orlando21alvarez@gmail.com

** Universidad Técnica Particular de Loja, Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica, Loja, Ecuador
e-mail: jlmaldonado7@utpl.edu.ec

*** Universidad Nacional de Loja, Área de la Energía, Loja, Ecuador
e-mail: thuesmon@yahoo.es

Resumen: En el presente trabajo, se analizan las series de datos mensuales de la velocidad del viento en 10 estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Loja, Ecuador. Se partió de la información proporcionada por el INAMHI, completando las series y determinando su normalidad y homogeneidad de acuerdo a la metodología utilizada por Álvarez y otros (2013). Se obtuvieron los principales estadígrafos y se analizaron las series cronológicas, así como las posibilidades de utilizar la fuerza del viento para la obtención de energía en las zonas en las que se encuentran emplazadas las estaciones.

Palabras clave: Homogeneidad, Normalidad, INAMHI, Series Cronológicas, Velocidad del viento

Abstract: In the present work, it was analyzed monthly data series of wind speed in 10 Meteorological Stations landed in Loja province, Ecuador. Using the information of the Meteorological and Hydrological National Institute (INAMHI), with lacks in the data series. They was completed, normalized and homogenized according to the methodology used by Alvarez et al. (2013). The principal statistics were obtained and the time series were analyzed, and so the possibilities of using the wind power for energy use in the areas where the meteorological stations are landed.

Keywords: Homogeneity, Normality, INAMHI, Time Series, Wind Power.

1. INTRODUCCIÓN

Tras la explotación y uso indiscriminado de fuentes de energía no renovables tales como el petróleo, carbón, gas natural, así como de materiales radiactivos para la obtención de energía, ya sea eléctrica o calorífica, que han llevado al agotamiento de casi la mayor parte de reservas existentes en el planeta y, considerando la poca disponibilidad de estos recursos, sus costos, la gran laboriosidad necesaria para obtenerlos y por el alto impacto que provocan en nuestro planeta los gases producto de la combustión de los mismos al momento de su utilización, en la actualidad se ha optado por la búsqueda y aplicación de nuevas tecnologías para obtener energía a partir de fuentes renovables no contaminantes como son la de biomasa, energía del mar, energía geotérmica, energía hidroeléctrica, energía solar (fotovoltaica), energía eólica.

Para la creación de una central fotovoltaica, térmica o eólica se necesitan datos que, en general, provienen de estaciones meteorológicas para poder determinar la capacidad del lugar para realizar determinado proyecto, y puesto que algunas

estaciones no cuentan con todos los datos, es decir poseen lagunas en las series de observaciones se hace necesario proceder a rellenar esos vacíos utilizando diferentes métodos de cálculo, así como determinar la normalidad y homogeneidad de los mismos.

Esta fue la situación que se presentó cuando se trataron de utilizar series de datos de velocidad del viento obtenidas en diferentes estaciones meteorológicas (actualmente pertenecientes al INAMHI), a fin de responder a las necesidades propias del Proyecto de Investigación 754; "Desarrollo de modelos espacio temporales de variables solares y eólicas, para estimar el potencial energético en la Región Sur del Ecuador", auspiciado por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (Senescyt) y la Universidad Nacional de Loja (UNL).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el área de estudio existen 20 estaciones meteorológicas, de las cuales se recopilaban los datos mensuales de velocidad del viento durante el periodo 1982-2010, y se seleccionaron las que poseían un mínimo de 20 años de datos (las 10 estaciones relacionadas en la Tabla 1). En el caso de las estaciones meteorológicas que se incluyeron en el presente

Artículo recibido el 15 de diciembre, 2014; revisado XX de 2014. La presente investigación es parte del proyecto: "Desarrollo de modelos espacio temporales, de las variables eólicas y solares, para estimar el potencial energético en la RSE", que fue financiado en su mayor parte por la SENESCYT el marco del Proyecto 754-UNL.

trabajo, se encontraron lagunas en los datos, los cuales fueron cubiertos utilizando para ello la ecuación de la tendencia de la variable siempre que la serie cumpliera con la condición de normalidad. Una vez determinada la normalidad, se debe determinar si las series son homogéneas.

Por lo complicado del relieve, el análisis de homogenización de la información no se puede realizar considerando que toda el área comprendida entre las estaciones existentes posea un solo patrón de comportamiento climático, por lo cual se realizaron estudios de correlación con el objetivo de determinar aquellas que tienen comportamientos similares, al menos en lo que respecta a la velocidad del viento.

Posteriormente estos datos serían corregidos utilizando otras estaciones con correlaciones aceptables mediante métodos de regresión lineal múltiple. En la Fig. 1 se muestra la ubicación de las estaciones, superpuesta al Modelo digital del Terreno (MDT) confeccionado al efecto.

Tabla 1: Estaciones Meteorológicas incluidas en el presente trabajo.

LONG	LAT	ALT	CÓDIGO	NOMBRE
-79.2	-4.04	2160	M033	LA ARGELIA, LOJA
-79.23	-3.62	2525	M142	SARAGURO
-79.27	-4.22	1453	M143	MALACATOS
-79.24	-4.31	1560	M145	QUINARA, INAMHI
-79.55	-4.33	1950	M146	CARIAMANGA
-79.17	-4.37	1835	M147	YANGANA
-79.95	-4.1	1984	M148	CELICA
-79.43	-4.23	2042	M149	GONZANAMA
-79.43	-4.58	1672	M150	AMALUZA, INAMHI
-80.24	-4.38	223	M151	ZAPOTILLO

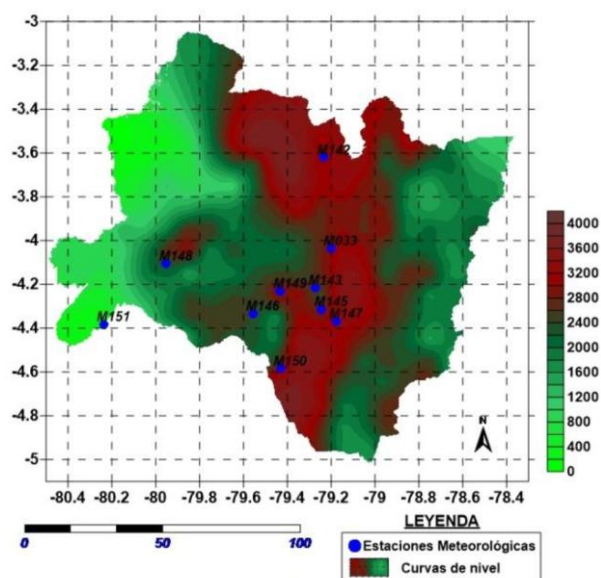


Figura 1. Estaciones meteorológicas y Modelo Numérico de Altitud de la zona de estudio. (Escala gráfica en km).

Para determinar la normalidad de las series, se utilizaron dos métodos, las prueba de chi cuadrado y de JarqueBera.

Como se conoce, la ventaja de las pruebas no paramétricas radica precisamente en el hecho de que no se necesita del conocimiento de características poblacionales que en muchos casos son ignoradas. Entre las pruebas no paramétricas más conocidas están las llamadas pruebas chi-cuadrado, que deben su nombre a que el estadígrafo de prueba utilizado sigue la distribución homónima.

Dos de las aplicaciones inmediatas de las pruebas chi-cuadrado son las que se conocen como pruebas para la bondad del ajuste y pruebas para independencia. Las pruebas para la bondad del ajuste se utilizan para verificar si un grupo de datos/observaciones se ajusta bien al comportamiento de alguna distribución probabilística conocida, como la normal o la de Poisson. Para el análisis de normalidad se utilizan también la prueba Kolmogorov – Smirnov y la prueba Jarque - Bera, entre otras[1].

2.1 Prueba de Chi-Cuadrado para Normalidad

Tiene gran importancia el poder conocer si un grupo de datos sigue o no una distribución normal. La prueba χ^2 es adecuada para dar solución a este tipo de problema. Las hipótesis correspondientes a esta prueba son:

H_0 : $X \sim N$ (La variable sigue una distribución normal)

H_1 : $X \not\sim N$ (La variable no sigue una distribución normal)

Para verificar la hipótesis de normalidad se toma una muestra aleatoria de tamaño n y se agrupan las observaciones en k clases o categorías, determinando para cada clase las frecuencias observadas (O_i). La prueba busca comparar tales frecuencias observadas con las frecuencias esperadas bajo la condición de normalidad (e_i); las cuales se calculan multiplicando el total de observaciones (n) por la probabilidad adjudicable a la variable de pertenecer a cada clase asumiendo que hay normalidad (P_i), así: $n \cdot e_i = n \cdot P_i$.

Estadístico de prueba se define como:

$$\chi_0^2 = \sum \frac{(n_{oi} - n_{ei})^2}{n_{ei}} \quad (1)$$

2.2 Normalidad de las Perturbaciones

Este supuesto no es utilizado en el teorema de Gauss-Markov para estimación por el método de Mínimos Cuadrados Ordinario (MCO), de aquí que las propiedades de los estimadores de MCO se siguen conociendo aun cuando no se cumpla el supuesto de normalidad, es decir, los estimadores siguen siendo lineales, insesgados y tienen mínima varianza.[6].

Sin embargo, sobre la hipótesis de normalidad se han edificado la mayor parte de los contrastes habituales utilizados y en particular la de significancia de los parámetros del modelo. Aunque los contrastes t y F pueden mantener su validez en forma aproximada en situaciones de no normalidad, aunque utilizadas en forma más conservadora, que la habitual (haciendo más restrictivas las pruebas y niveles de significación más bajos) [5] [6].

2.3 Prueba de Jarque-Bera o Estadístico de Wald para Normalidad.

Es una prueba asintótica de normalidad para grandes muestras. Una prueba de normalidad es un proceso estadístico utilizado para determinar si una muestra o cualquier grupo de datos se ajustan a una distribución normal. Está basada en los residuos de MCO, esta prueba calcula la asimetría (skewness) y la curtosis o apuntamiento de los residuos de MCO y utiliza el siguiente estadístico de prueba:

$$JB = n \left(\frac{A^2}{6} + \frac{(K - 3)^2}{24} \right) \quad (2)$$

Donde A es la asimetría o skewness y K es la curtosis o apuntamiento. Aquí n es el número de observaciones (o grados de libertad en general).

Las medidas de asimetría y curtosis son indicadores que permiten establecer el grado de simetría y curtosis que presenta una distribución de probabilidad de una variable aleatoria sin tener que hacer su representación gráfica. Si los datos provienen de una distribución normal, el estadístico de Jarque-Bera tiende asintóticamente a una distribución chi-cuadrado con dos grados de libertad, de aquí que el estadístico pueda ser usado para probar la hipótesis de que los datos provienen de una distribución normal [6].

Posteriormente estos datos serían corregidos utilizando otras estaciones con correlaciones aceptables mediante métodos de regresión lineal múltiple.

La homogeneidad de las series se analizó de varias maneras para poder comparar diversos resultados.

Por un lado se utilizaron las pruebas no paramétricas de Pettitt y Von Neumann, recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial [7]. Aunque son pruebas de homogeneidad absoluta, tienen la ventaja de no precisar que las series tengan determinada función de densidad de probabilidades.

También se utilizó la prueba SNHT, descrita con más detalle a continuación.

2.4 Prueba SNHT (Standar Normal Homogeneity Test)

Este test formulado inicialmente por Alexandersson (1986), ha sido muy difundido y se han desarrollado versiones para analizar cambios en la media, la varianza y la tendencia de la serie [2]. Además se ha aplicado a una gran variedad de variables, y aquí se ha aplicado al viento de acuerdo con la metodología utilizada por Álvarez y Gutiérrez (2012) [3], donde, como resultado del método para sustituir valores en las series de lluvias diarias máximas anuales no homogéneas dentro de una cuenca considerada homogénea, utilizando para ello los residuales de Student tomando en cuenta las correlaciones lineales múltiples, donde la variable

dependiente es la serie no homogénea y las independientes las series pluviométricas homogéneas dentro de la cuenca y la variable auxiliar Q de la prueba de Alexandersson correspondiente a cada serie no homogénea, se demostró que las nuevas series generadas cumplen con el requisito de homogeneidad y además no se detectaron diferencias significativas en los valores de los estadígrafos principales de las series al modificar las mismas.

De aquí que se seleccionara el método según lo planteado por Herrera S. (2004), tal como la utilizaron Álvarez y otros [4].

$$y_i = \frac{y_i - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

Por lo complicado del relieve, el análisis de homogenización de la información no se puede realizar considerando que toda el área comprendida entre las estaciones existentes posea un solo patrón de comportamiento climático, por lo cual se realizaron estudios de correlación con el objetivo de determinar aquellas que tienen comportamientos similares, al menos en lo que respecta a la velocidad del viento.

Posteriormente estos datos serían corregidos utilizando otras estaciones con correlaciones aceptables mediante métodos de regresión lineal múltiple.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 2 se muestra el comportamiento del viento durante el periodo 1982-2010, destacándose la estación M147, la cual presenta valores de velocidad del viento por encima de los 8 m/s durante todo el periodo de análisis.

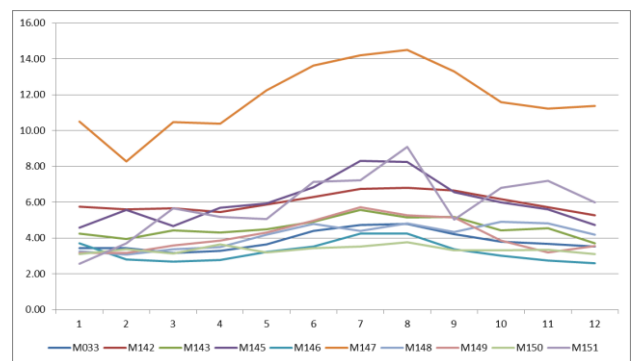


Figura 2. Marcha anual promedio (1982 – 2010) de las 10 estaciones incluidas en el trabajo.

A continuación se presentan las series cronológicas correspondientes a las 10 estaciones meteorológicas incluidas en el presente trabajo.

Se puede observar en las Figs. 3 y 4 correspondientes a las estaciones meteorológicas La Argelia y Saraguro, que en ambos casos se presenta un incremento de la velocidad del viento en los primeros años, seguida de una disminución y un posterior aumento de la velocidad. En el caso de Saraguro se retoma la disminución en los últimos años, lo cual no ocurre en La Argelia.

Las estaciones Malacatos, Quinara y Cariamanga muestran una estabilidad en los valores medios del viento posterior al

año 1998 (Figs. 5 – 7). Igual ocurre en la estación Celica (Fig. 10).

En la estación Yangana (Fig. 8), que es precisamente la estación que presenta los mayores valores de velocidad media del viento, se observa una disminución significativa de los valores medios anuales desde el año 2006, con un ligero incremento en el 2010, lo cual puede estar determinado por algún cambio en la estación, bien sea de instrumental, de forma de obtener la información, o una mudanza de la misma.

Finalmente la estación Gonzanamá (Fig. 9) presenta una tendencia al aumento de la velocidad media anual del viento, mientras las estaciones Amaluza y Zapotillo (Figs. 11 y 12) tienen una tendencia cercana a cero.

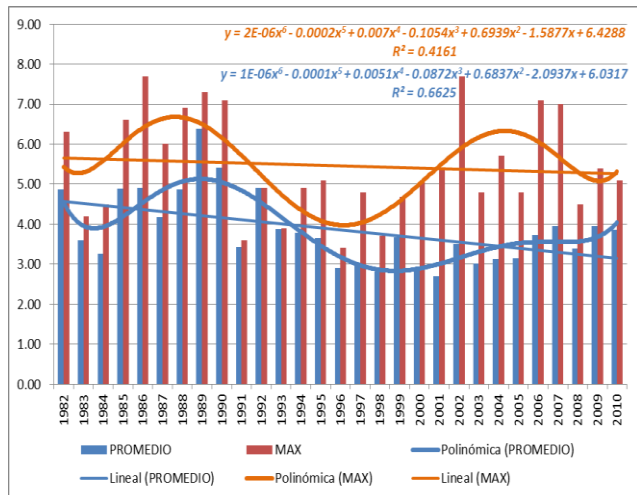


Figura 3. Series Cronológicas de las velocidades promedio y máxima anuales correspondientes a la Estación La Argelia.

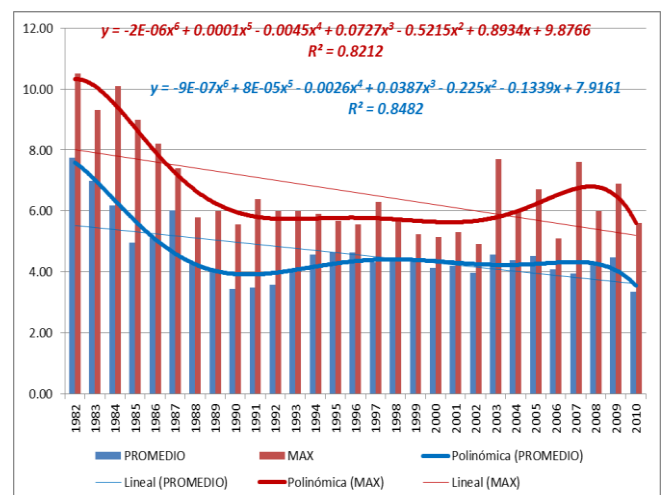


Figura 5. Series Cronológicas de las velocidades promedio y máxima anuales correspondientes a la Estación Malacatos

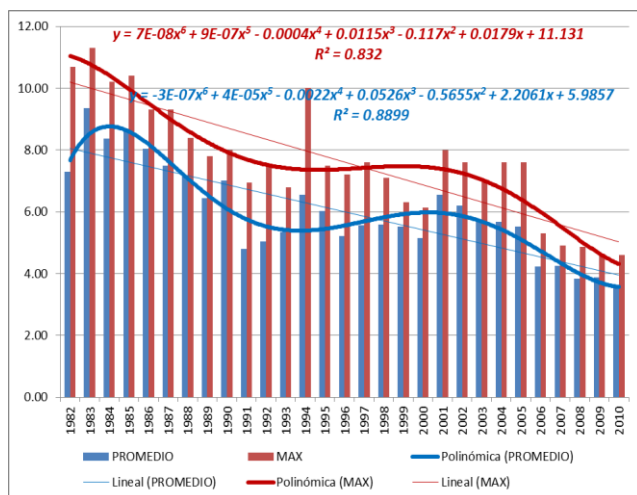


Figura 4. Series Cronológicas de las velocidades promedio y máxima anuales correspondientes a la Estación Saraguro

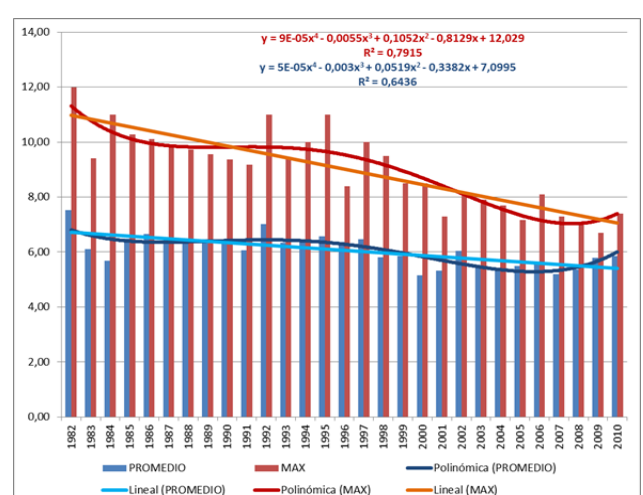


Figura 6. Series Cronológicas de las velocidades promedio y máxima anuales correspondientes a la Estación Quinara

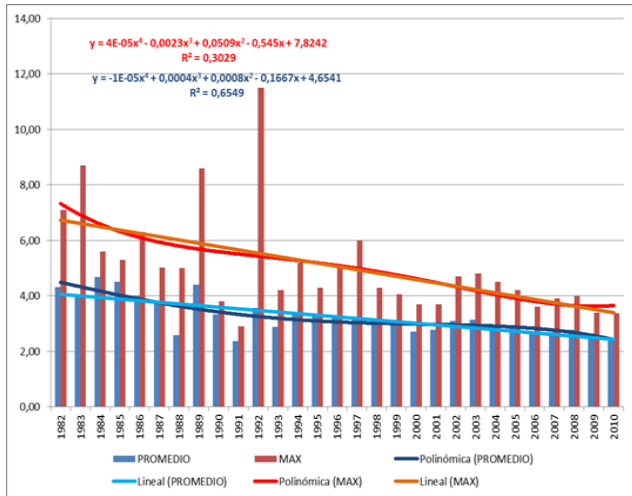


Figura 7. Series Cronológicas de las velocidades promedio y máxima anuales correspondientes a la Estación Cariamanga.

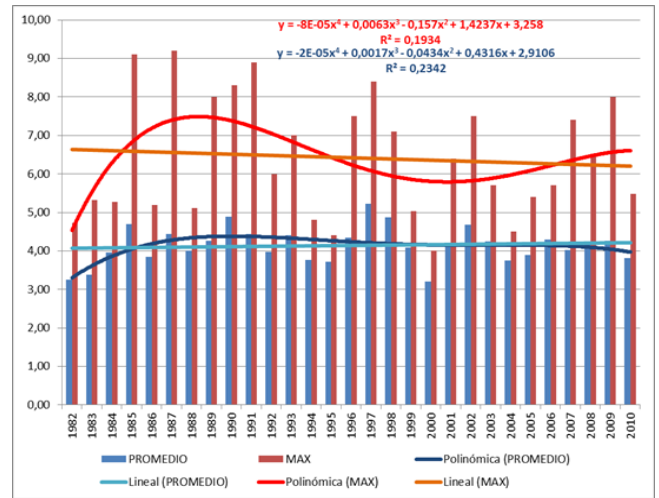


Figura 10. Series Cronológicas de las velocidades promedio y máxima anuales correspondientes a la Estación Celica

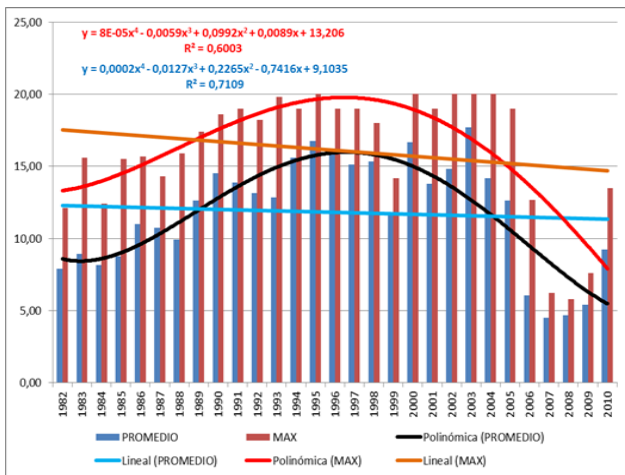


Figura 8. Series Cronológicas de las velocidades promedio y máxima anuales correspondientes a la Estación Yangana.

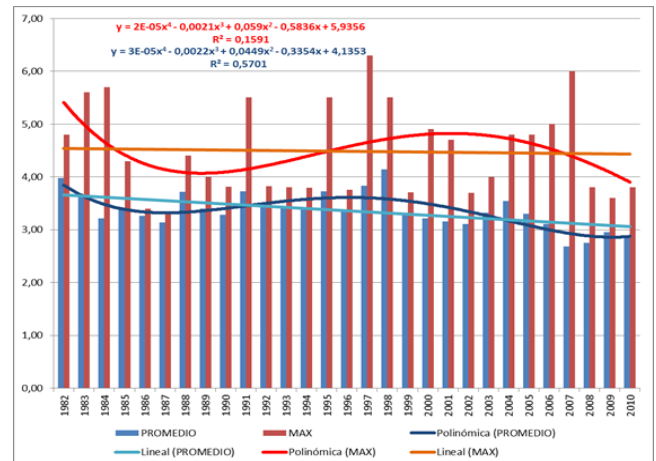


Figura 11. Series Cronológicas de las velocidades promedio y máxima anuales correspondientes a la Estación Amaluzá.

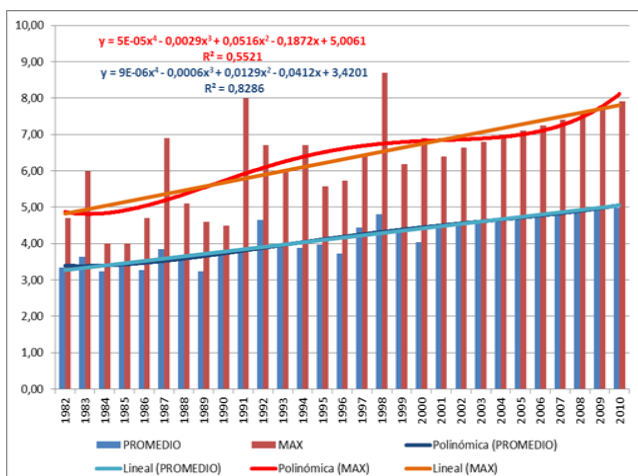


Figura 9. Series Cronológicas de las velocidades promedio y máxima anuales correspondientes a la Estación Gonzanama.

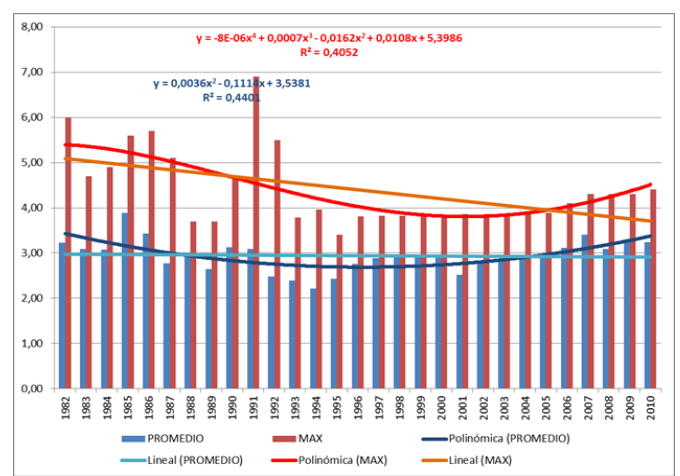


Figura 12. Series Cronológicas de las velocidades promedio y máxima anuales correspondientes a la Estación Zapotillo

En la figura 13, en el mapa de la velocidad del viento promediada para el período anual se puede observar, que a pesar de que la densidad de estaciones no es la adecuada, los mayores valores se agrupan en la zona andina.

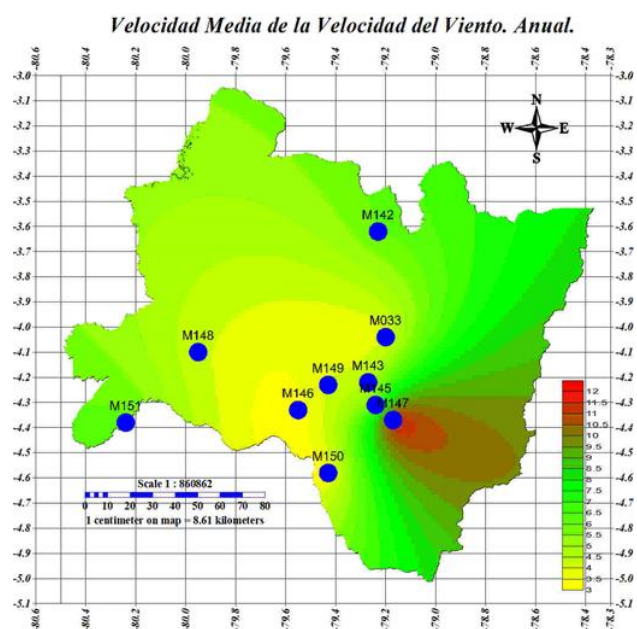


Figura. 11. Velocidad media del viento anual (1982 – 2010).

Analizando el comportamiento por meses de la velocidad del viento por estaciones, se presenta, en primer lugar la estación La Argelia (Tabla 2), la cual presenta valores promedio durante todo el año por encima de los 3 m/s, llegando a alcanzar valores máximos superiores a 7,5 m/s, lo cual, permitiría ubicar en la zona generadores de baja potencia o bien molinos multipala para bombeo de agua.

Tabla 2: Estadígrafos de la velocidad media del viento (m/s). La Argelia

	PROM.	MAX	MIN	MED.	VARIANZA
ENE.	3.4	5.2	2.0	3.4	0.9
FEB.	3.5	5.9	2.2	3.4	0.7
MAR.	3.2	5.9	1.7	3.0	1.0
ABRIL	3.3	5.9	1.8	3.2	0.9
MAY.	3.7	5.9	2.2	3.6	0.9
JUN.	4.4	7.7	2.4	4.2	2.0
JUL.	4.7	7.7	2.3	4.5	1.6
AGOS.	4.8	7.7	2.7	4.5	2.0
SEPT.	4.2	7.3	2.0	4.1	1.9
OCT.	3.8	7.3	1.8	3.5	1.9
NOV.	3.7	7.3	1.5	3.2	2.1
DIC.	3.5	7.3	1.3	3.3	1.8
ANUAL	3.8	6.4	2.7	3.7	0.8

Igual ocurre con la estación meteorológica Saraguro, donde el valor mínimo de velocidad del viento promedio incluso supera durante todo el año los valores de 5,3 m/s, y un máximo medio anual de 11,3 m/s.

La estación Malacatos (Tabla 3) también presenta valores por encima de 3,7 m/s y llega a alcanzar valores máximos promedio de 10,5 m/s. En la zona donde se encuentra esta estación hay posibilidades de montaje de aerogeneradores de baja potencia o molinos de viento para elevar agua.

Otra zona con posibilidades se presenta en Quinara, donde los valores medios mensuales de la velocidad del viento superan durante todo el año el valor de 4,7 m/s, llegando a alcanzar un valor máximo promedio del viento de 12 m/s.

Tabla 3: Estadígrafos de la velocidad media del viento (m/s). Malacatos

	PROM.	MAX	MIN	MED.	VARIANZA
ENE.	4.2	9.0	2.0	3.8	2.8
FEB.	3.9	6.0	2.0	3.9	0.9
MAR.	4.4	9.0	2.0	4.2	1.9
ABRIL	4.3	7.8	2.0	4.2	1.6
MAY.	4.5	7.4	2.0	4.5	1.7
JUN.	4.9	8.4	2.4	4.5	2.2
JUL.	5.6	10.1	3.0	5.1	3.0
AGOS.	5.1	10.5	3.0	5.1	2.4
SEPT.	5.2	9.1	3.0	5.0	1.7
OCT.	4.4	8.4	2.5	4.2	1.7
NOV.	4.6	8.8	2.0	4.2	2.1
DIC.	3.7	6.8	2.3	3.6	1.0
ANUAL	4.6	7.8	3.3	4.4	1.0

Sin embargo en la zona de Carimanga, se observan 5 meses con valores de la velocidad media del viento por debajo de 3 m/s, desde febrero hasta abril y noviembre y diciembre.

La zona de Yangana (Tabla 4) es, de todas las analizadas, la que mayor potencial promete, con valores máximos superiores a 20 m/s y valores medios por encima de 8 m/s durante todo el año.

Estudios determinan que en la provincia de Loja existe la posibilidad de explotar más de 200 MW de potencia nominal con energía eólica sobre los sitios Villonaco, Membrillo, Ventanas, Santiago y Chinchas, con un factor de planta del 50%, en este sentido se recomienda realizar una campaña de medición a diferentes alturas de velocidad y dirección de viento en la zona de Yangana, de manera que se pueda contar con información confiable que permita la toma de decisiones para un futuro emplazamiento de parque eólico en este sector.

La estación de Zapotillo es la que presenta menor potencial, con 7 meses con velocidades del viento medio por debajo de 3 m/s.

La zona de Celica presenta buenas condiciones para la ubicación de aerogeneradores de baja potencia, con valores de velocidad del viento medio superior a los 3 m/s durante todos los meses del año, alcanzándose valores máximos superiores a 4,5 m/s durante todo el año.

Tabla 4: Estadígrafos de la velocidad media del viento (m/s). Yangana.

	PROM.	MAX	MIN	MED.	VARIANZA
ENE.	10.5	19.0	4.2	10.2	21.5
FEB.	8.3	18.0	2.3	6.0	25.3
MAR.	10.5	19.0	4.0	10.1	20.2
ABRIL	10.4	19.0	4.0	10.5	17.4
MAY.	12.2	20.0	4.0	12.1	20.5
JUN.	13.6	19.0	4.3	14.3	21.4
JUL.	14.2	20.0	5.2	14.7	21.4
AGOS.	14.5	20.0	3.8	15.7	24.2
SEPT.	13.3	20.0	4.2	13.1	20.3
OCT.	11.6	20.0	4.0	11.1	19.5
NOV.	11.2	20.0	4.0	11.2	22.5
DIC.	11.4	18.0	4.0	11.4	19.1
ANUAL	11.8	17.7	4.5	12.6	14.6

Las zonas de Gonzanamá y Amaluza presentan valores medios mensuales de la velocidad del viento por encima de los 3 m/s todo el año, con valores máximos en Gonzanamá de 7,9 m/s y en Amaluza de 6,0 m/s.

4. CONCLUSIONES

Se lograron rellenar las lagunas de los datos de velocidad del viento en 10 estaciones meteorológicas para el período 1982 – 2010.

Se demostró que las series cumplen con una distribución normal y son homogéneas.

Se calcularon los estadígrafos principales de las series y se analizó el comportamiento de las series cronológicas.

Se determinaron las zonas donde es factible ubicar aerogeneradores de baja potencia a partir de los valores medios mensuales de velocidad del viento.

Se recomienda continuar trabajando en esta dirección no solamente en la Región Sur del Ecuador, sino en todo el país, incluyendo otras variables meteorológicas.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo científico ha sido financiado por el Proyecto Prometeo de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Ecuador).

REFERENCIAS

- [1] Alexandersson, H. (1986). Homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6:661–675.
- [2] Alexandersson and Moberg (1997), Homogenization of Swedish Temperature. Data. Part I: Homogeneity Test for Linear Trends, *Int. J. Climatol.*, 17, 25-34.
- [3] Álvarez, O.H.y T. Gutiérrez (2012), Homogeneización de series de lluvias máximas anuales en una cuenca en la provincia de Matanzas, Cuba.XXI Congreso Mexicano de Meteorología y VI Congreso Internacional de Meteorología, 2012.
- [4] Álvarez, O.H., et al., (2013): “Homogeneización de series de velocidad del viento mensuales en las estaciones meteorológicas del INAMHI en Loja, Ecuador.” *Revista de Climatología*, Vol. 13 (2013): 35-44 ISSN 1578-8768
- [5] Cano Rafael y José M. Gutiérrez (2004): “Relleno de lagunas y homogeneización de series de precipitación en redes densas a escala diaria”.
- [6] Herrera S. (2004): “Homogeneización e Interpolación de Observaciones de Alta Resolución. Proyección Regional de Escenarios de Cambio Climático. Técnicas y Proyectos en Curso.
- [7] Thom H.C.1966. Some methods of climatological analysis. Technical note No. 81. World Meteorological Organization. 52 pp.