

Anexo 3

Modelos estadísticos aplicados a los datos de viento

Esta parte del Atlas presenta el marco teórico de la modelación temporal de las series de viento, la cual incluyó complementación de datos faltantes mediante modelos autorregresivos integrados de media móvil denominados ARIMA. Adicional a ello, se describen las distribuciones de probabilidad y se suministran valores mensuales de parámetros de escala y forma de la distribución Weibull en algunos lugares del país, típicos para estudios de potencial eólico.

3.1 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES EN LAS SERIES MENSUALES DE LA VARIABLE: DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO

Este procedimiento se refiere esencialmente al análisis estadístico de las series mensuales correspondientes a la variable meteorológica “velocidad del viento”, con el fin de describir no solo su comportamiento temporal, sino mediante la identificación de un modelo estadístico (ARIMA), estimar sus datos faltantes. Este modelo se denomina modelo autorregresivo integrado con promedio móvil.

Asimismo, el proceso para la estimación de los valores faltantes en las observaciones climatológicas, relacionadas con la dirección del viento, se basa en la aplicación de una medida de tendencia central, como la moda. Su utilización depende de la variabilidad que presenta la serie.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Sea $\{z_1, z_2, \dots, z_t\}$, una serie temporal proveniente del proceso estocástico $\{Z_t\}$. Supóngase que el proceso obedece al modelo ARIMA:

$$\Phi_p(B^s) \phi p(B) \delta_d(B) Z_t = \theta_q(B) \Theta_q(B^s) a_t,$$

donde $\Phi_p(B)$, $\theta_q(B)$, $\Phi p(B)$ y $\Theta_q(B^s)$, son polinomios de grados p, q y P, Q , de la parte autorregresiva estacionaria y de la parte de media móvil de los procesos no estacionales y estacionales respectivamente. Asimismo, $\delta_d(B)$, representa el producto eventual de operadores de diferenciación simple y estacional y $\{a_t\}$ es un proceso de ruido blanco, de media cero y varianza σ_a^2 . Los modelos se denominan: ARIMA $(p,d,q) \times (P,D,Q)$.

La metodología que se utiliza fue desarrollada por Gómez & Maravall (1996) y para implementarla se utilizó el programa computacional TRAMO (Time Series Regression with ARIMA Noise, Missing Observations, and Outliers).

En la aplicación de esta metodología se debe tener en cuenta el número de datos faltantes. Existen esencialmente dos métodos: el primero de ellos se conoce como Datos Atípicos Aditivos (cuando no se superan los 30 datos faltantes) y el segundo como Suavizador de Punto Fijo (SPF), en caso contrario.

3.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

3.3.1 IDENTIFICACIÓN DEL MODELO

Para la construcción de un modelo ARIMA se examina en la serie la propiedad de estacionariedad y en caso de no presentarse se establece dicha propiedad.

La estacionariedad en la serie, con respecto a su varianza, se establece mediante la transforma-

ción logarítmica de Box-Cox. Asimismo, para estabilizar el nivel de la serie, si la serie presenta tendencia o muestra cambios de nivel en la media, se utiliza un orden de diferenciación simple (d), el cual consiste en aplicarle a la serie $\{Z_t\}$ el operador diferencia (∇_n) un número n apropiado de veces, hasta lograr la estacionaridad de la misma. De esta forma, si la serie tiene componente estacional se debe aplicar una diferencia estacional, denotada por (∇_s) , con el fin de establecer estacionaridad en la serie. En general para la identificación del modelo se utilizan las funciones de autocorrelación simple y parcial.

3.3.2 ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL MODELO

Se identifica el modelo mediante la definición de los órdenes de diferenciación simple y estacional y de los polinomios autorregresivo y de promedios móviles. Posteriormente se estiman $\phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q, \Phi_1, \dots, \Phi_p, \dots, \Theta_1, \dots, \Theta_Q$ que representan los parámetros de los polinomios: $\phi_p(B)$, $\theta_q(B)$, $\Phi_p(B^s)$ y $\Theta_Q(B^s)$. Dicha estimación se realiza por el método de máxima verosimilitud y sus valores deben oscilar entre -1 y 1.

Para examinar la significación estadística de los parámetros estimados se utiliza el estadístico T-Student a un nivel de significación del 5%.

3.3.3 CRITERIOS PARA VALIDACIÓN DEL MODELO

En esta etapa se verifican las hipótesis estadísticas sobre el proceso $\{a_t\}$ usando los residuales del modelo. Es decir, sus valores deben satisfacer las siguientes condiciones: media igual a cero, varianza constante, independencia y distribución probabilística normal.

Los dos primeros supuestos se verifican utilizando el estadístico T-Student y mediante el análisis de la gráfica de los residuales contra el tiempo, para constatar si la varianza es o no constante. La normalidad de los residuos se verifica mediante la prueba estadística de bondad de ajuste Chi-cuadrada.

Asimismo, para determinar la significación de las autocorrelaciones se utilizan los estadísticos Q de Ljung-Box y Durbin-Watson a un nivel de probabilidad del 95%.

3.4 ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES

A continuación se presentan los resultados de la aplicación de la metodología a los registros mensuales de la estación meteorológica Nataima, ubicada en el municipio de El Espinal, departamento del Tolima. La serie original y la interpolada se presentan en las Figs. 3-1 y 3-2, respectivamente.

Tabla 3-1. Promedios mensuales de la velocidad del viento (m/s)

Estación: Nataima Período: 1981-2003												Municipio: Espinal Dpto.: Tolima				
AÑO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DIC				
1981	2.4	2.4	2.8	2.378	2.2	2.2	3	2.8	3	2.4	2.173	2				
1982	2.4	2.2	2.3	2.2	2.2	2.4	2.9	3.7	2.9	2.3	2.2	2				
1983	2.4	2.6	2.4	2.2	2.1	2.4	3.2	3.4	2.9	2.7	2.3	2.133				
1984	2.355	2.485	2.574	2.355	2.248	2.41	2.919	3.032	2.5	2.4	2.1	2				
1985	2.8	2.65	2.8	2.367	2.1	2.9	3.1	2.7	2.6	2.3	2.2	2.2				
1986	2.314	2.3	2.3	2.308	2.3	2.4	3.3	3.3	3.5	2.4	2.4	2.3				
1987	2.442	2.8	2.9	2.5	2.3	2.405	2.861	2.9	2.8	2.2	2.3	2.2				
1988	2.2	2.6	3.2	2.5	2.4	2.4	2.7	2.7	2.3	2.5	2.2	2.1				
1989	1.8	2.4	2.5	2.5	2.2	2.3	2.9	2.4	2.9	2.5	2.4	2.3				
1990	2.4	2.5	2.7	2.3	2.3	2.5	2.9	3.6	3.1	2.5	2.1	2.1				

(Continúa)

AÑO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	2.5	2.8	2.3	2.4	2.2	2.2	2.6	3.2	3.3	2.7	2.1	2.1
1992	2.3	2.2	2.8	2.4	2.1	2.4	2.7	3.4	2.8	2.6	2.149	2
1993	2	2.4	2.4	2	2	2.3	2.6	3.5	2.9	2.4	1.9	1.9
1994	2	2	2.2	2	1.9	2.2	3	3.3	3.1	2.2	1.9	1.8
1995	2.2	2.3	2.4	2.4	2.4	2.1	2.3	2.3	2.8	2.3	2	1.8
1996	1.9	2.2	2.2	2.3	2	2.1	2.6	2.9	2.6	1.9	1.9	1.838
1997	1.9	2.161	2.19	2	2.2	1.9	3.1	3.6	2.9	2.4	2.2	1.8
1998	2.1	2.3	2.1	1.8	2	2.2	2.6	2.5	2.5	2.4	1.8	1.8
1999	1.9	1.9	2.1	2.056	2.1	1.9	2.4	2.9	2.1	2.116	2	2.1
2000	2.4	2.3	2	1.9	1.8	1.8	2.2	2.7	2.2	2.1	2.1	1.8
2001	1.8	2	1.7	2.1	2	2.3	2.2	2.9	2.3	2.5	1.8	1.7
2002	1.895	2.1	2.2	2	2.2	2.3	2.2	2.8	2.3	2.2	1.7	1.6
2003	1.8	2	1.9	2	1.9	1.8	2.3	2.8	2.4	1.8	1.7	1.8

Los valores sombreados corresponden a los valores estimados con el modelo ARIMA.

METHOD OF ESTIMATION: EXACT MAXIMUM LIKELIHOOD				
PARAMETER	ESTIMATE	STD ERROR	T RATIO	LAG
AR1 1	-.26042	0.69231E-01	-3.76	1
MA1 1	-.98436	0.26704	-3.69	1
MA2 1	-.88558	0.55958E-01	-15.83	12
MODEL: ARIMA (1,1,1) (0,1,1)12				
EST-STATISTICS ON RESIDUALS				
MEAN =	-0.0054594	ST. DEV. OF MEAN = 0.0060306	T-VALUE = -0.9053	
NORMALITY TEST =	0.3089E-01	(CHI-SQUARED(2))	SKEWNESS = 0.0004	(SE = 0.1591)
			KURTOSIS = 2.9441	(SE = 0.3182)
DURBIN-WATSON =	2.0362			
LJUNG-BOX Q VALUE OF ORDER 24 IS 10.57 AND IF RESIDUALS ARE RANDOM IT SHOULD BE DISTRIBUTED AS CHI-SQUARED(21)				

En el proceso se obtuvo un modelo que incluye parámetros de promedio móvil de orden uno y de orden 12 estacional y autorregresivo de orden uno. La componente promedio móvil indica que cada observación de la variable está determinada

principalmente por las componentes aleatorias de las observaciones tanto del mes como del año anterior. Igualmente, el parámetro autorregresivo indica el grado de influencia de las observaciones del mes anterior.

Figura 3-1. Serie Original

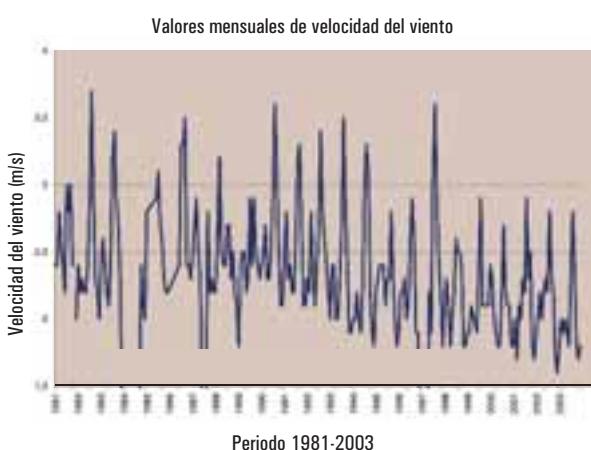
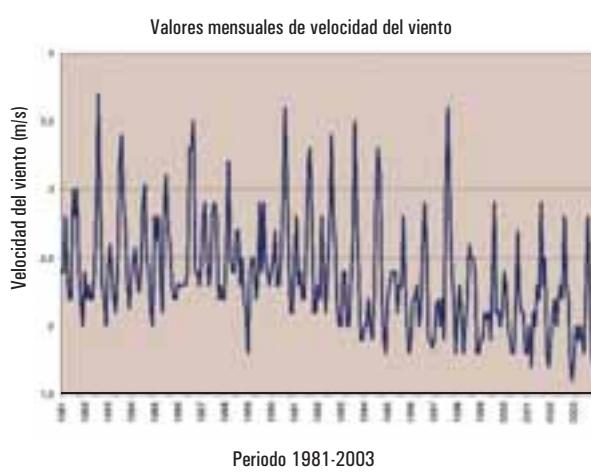


Figura 3-2. Serie Interpolada



3.5. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LA INFORMACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

La presente metodología incluye diferentes aspectos relacionados con el análisis descriptivo de la información horaria de la variable y el ajuste de los modelos probabilísticos a sus series mensuales, con el fin de describir teóricamente su comportamiento.

Este proceso se desarrolla en varias etapas: la primera comprende la descripción del comportamiento diario de esta variable y la construcción de la distribución de frecuencias de sus valores horarios; la segunda, la determinación tanto de su distribución empírica como de su distribución teórica, según el modelo Weibull, y la última se refiere a la construcción de los intervalos de probabilidad de ocurrencia de sus diferentes valores.

La determinación de estos intervalos permite establecer una escala de categorías con el fin de clasificar el valor observado como un evento normal o extraordinario.

3.5.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA INFORMACIÓN HORARIA

La información básica para el presente análisis corresponde a los promedios horarios, de velocidad del viento, obtenidos en las diferentes estaciones meteorológicas del país. Como fase preliminar se describe su comportamiento diario mediante el análisis de sus velocidades horarias. Posteriormente, se construye para un mes determinado su distribución de frecuencias agrupando los valores por intervalos. Esta información permite identificar las magnitudes más frecuentes.

3.5.2 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD EMPÍRICA

El análisis probabilístico de las series mensuales se efectúa mediante la construcción de la distribución de probabilidad empírica. Se define como la frecuencia acumulada porcentual de los datos ordenados en forma ascendente y representa la probabilidad de ocurrencia de un valor menor al dato considerado. A cada valor se le asigna una probabilidad (F) igual a $m/(N+1)$, donde m es el número de orden del dato en la serie y N el número de datos.

La información que suministra esta distribución permite determinar sus nueve deciles D_1 , D_2 , ..., D_9 , y sus rangos interdecílicos. De esta forma un 10% cae entre D_1 y D_2 ; o entre D_3 y D_4 , y así sucesivamente. Igualmente un 10% cae por encima de D_9 .

Con los rangos interdecílicos se establece la siguiente escala de categorías: rangos que indican situación de normalidad son valores con probabilidad de ocurrencia acumulada entre 30% y 70%. Los valores inferiores y superiores a este intervalo indican situación de anormalidad.

3.5.3 MODELO DE PROBABILIDAD WEIBULL Y PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE

La función de distribución acumulativa de WEIBULL se define de la siguiente forma:

$$F(x; \alpha, \theta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \quad x \geq 0 \quad [3-1]$$

α es el parámetro de forma y β es el parámetro de escala.

$$\beta = \frac{M_x}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad [3-2]$$

M_x , es la media mensual
 Γ es la función gama

El valor del parámetro α se puede determinar mediante su relación con el coeficiente de variación o con el factor de energía. Igualmente, puede obtenerse por el método de análisis de regresión entre los valores de la variable y su probabilidad acumulativa, utilizando la transformación logarítmica y el método de mínimos cuadrados.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov: Esta es una prueba de bondad de ajuste. Se basa en una comparación entre las funciones de distribución acumulativa empírica y teórica de los datos ordenados en forma ascendente. Si esta comparación revela una diferencia significativa estadísticamente entre ellas, entonces no se acepta el ajuste del modelo probabilístico descrito por la ley Weibull.

3.5.4 APLICACIONES EN LA INFORMACIÓN HORARIA Y MENSUAL

Descripción del comportamiento diario: La información básica para el presente análisis corresponde a los registros horarios del mes de enero (1977-2001) de la estación meteorológica del aeropuerto Ernesto Cortissoz ubicado en el municipio de Soledad (Atlántico) tal como se muestra en la Fig. 3-3 y la Tabla 3-2.

Figura 3-3. Ciclo horario de la velocidad del viento para enero. Aeropuerto Ernesto Cortissoz

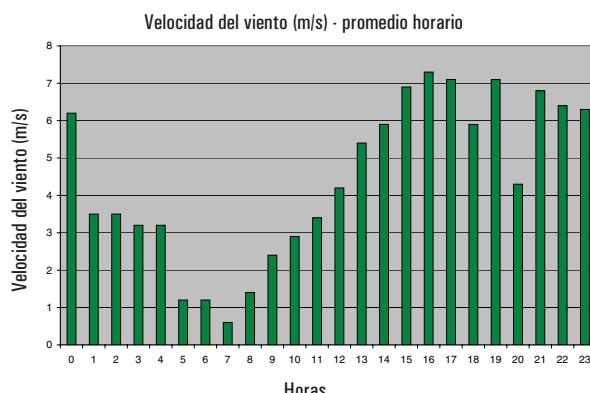


Tabla 3-2. Velocidades horarias de la velocidad del viento

Estación: Aeropuerto Ernesto Cortissoz. (Atlántico)
Mes: Enero (1977 – 2001)

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)			
Hora del día	Promedio	Hora del día	Promedio
0	6.2	12	4.2
1	3.5	13	5.4
2	3.5	14	5.9
3	3.2	15	6.9
4	3.2	16	7.3
5	1.2	17	7.1
6	1.2	18	5.9
7	0.6	19	7.1
8	1.4	20	4.3
9	2.4	21	6.8
10	2.9	22	6.4
11	3.4	23	6.3

En el análisis de su variabilidad horaria, de la Tabla 3-2, se destacan dos ciclos de mayor magnitud. El primero comprende a las horas de la tarde, entre las 15 y 19 horas, con valores que oscilan entre 5.9 y 7.3 m/s. El segundo ciclo se presenta en las últimas horas del día y sus valores oscilan entre 6.05 y 6.8 m/s.

Asimismo, el ciclo con menor magnitud se registra en las horas de mañana, entre las cinco y las ocho con valores que oscilan entre 0.6 y 1.4 m/s.

3.5.5 DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

La distribución de frecuencias de la velocidad del viento presenta las siguientes características: los valores oscilan en un rango entre 0 y 20.6 m/s. Se destacan por su mayor frecuencia los intervalos que incluyen valores entre 2.8 y 6.99 m/s y cubren el 51.1% del total de las observaciones. Los mayores valores oscilan, en un rango amplio, entre 11.2 y 20.6 m/s y representan solamente un 2.5% del total de las observaciones. (Ver Fig. 3-4 y Tabla 3-3).

Modelos de probabilidad y prueba de bondad de ajuste: La información básica para este análisis corresponde a los valores mensuales de la velocidad del viento. Para su análisis se desarrollan tres procesos, a saber. El primero, se refiere al ajuste del modelo probabilístico Weibull (método de análisis de regresión), el segundo, la aplicación de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y el tercero, la determinación de los intervalos de probabilidad.

El ajuste del modelo probabilístico se desarrolla para las series mensuales de la estación meteorológica del aeropuerto Ernesto Cortissoz, ubicado en el municipio de Soledad, Departamento del Atlántico, durante el período 1977-2001.

Figura 3-4. Distribución de frecuencias de la velocidad del viento para el Aeropuerto Ernesto Cortissoz

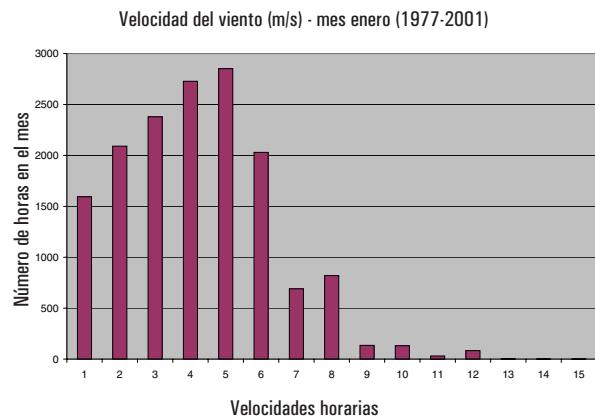


Tabla 3-3. Distribución de frecuencias de la velocidad del viento para el Aeropuerto Ernesto Cortissoz

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)			
Mes: Enero	Periodo: 1977-2001		
Intervalos		Promedio	Número de horas
0	1.39	0.7	1.594
1.4	2.79	2.1	2.091
2.8	4.19	3.5	2.379
4.2	5.59	4.9	2.728
5.6	6.99	6.3	2.852
7	8.39	7.7	2.030
8.4	9.79	9.1	690
9.8	11.19	10.5	820
11.2	12.59	11.9	135
12.6	13.99	13.3	131
14	15.39	14.7	31
15.4	16.79	16.1	83
16.8	18.19	17.5	3
18.2	19.59	18.9	1
19.6	20.99	20.3	1
Total número de horas		15.569	

Además de este proceso se han realizado, para las series mensuales de esta estación meteorológica, el ajuste de otros modelos probabilísticos como el normal y Weibull, cuyos parámetros de forma y escala se obtienen por dos métodos: según su relación con el coeficiente de variación y con el factor de energía. Con excepción de este último modelo, los demás modelos presentaron desviaciones casi similares con respecto a la distribución empírica. En el modelo Weibull, según el factor de energía se presentaron las mayores desviaciones con respecto a la distribución empírica y no acepta el ajuste en algunos meses. De esta forma, se selecciona el modelo de Weibull, método de análisis de regresión, debido a su método de estimación y a los requerimientos de sus parámetros α y β , en diferentes aplicaciones. (Ver Tablas 3-4 y 3-5). El resultado de la prueba de Kolmogorov-Smirnov se presenta en la Tabla 3-6.

Tabla 3-4. Distribución Weibull (D-W) de probabilidades (enero-junio). Período 1977-2001

Distribución	ENE		FEB		MAR		ABR		MAY		JUN	
Prob. Empírica	VEL	D-W	VEL	D-W	VEL	D-W	VEL	D-W	VEL	D-W	VEL	D-W
0.034	4.1	0.146	4.2	0.071	4.1	0.056	3.6	0.061	2.0	0.070	1.4	0.048
0.069	4.2	0.169	4.4	0.100	4.3	0.079	3.8	0.090	2.1	0.087	1.5	0.062
0.103	4.2	0.169	4.7	0.162	4.5	0.110	4.0	0.128	2.3	0.130	1.6	0.080
0.138	4.3	0.194	4.8	0.188	4.8	0.172	4.1	0.151	2.3	0.130	1.8	0.125
0.172	4.3	0.194	4.9	0.217	4.8	0.184	4.3	0.208	2.3	0.130	1.9	0.153
0.207	4.3	0.194	5.0	0.250	5.1	0.257	4.4	0.241	2.6	0.217	2.0	0.184
0.241	4.4	0.222	5.0	0.250	5.2	0.291	4.6	0.318	2.7	0.252	2.2	0.258
0.276	4.4	0.222	5.1	0.285	5.2	0.291	4.6	0.318	2.8	0.291	2.4	0.345
0.310	4.4	0.222	5.1	0.285	5.2	0.291	4.6	0.318	2.9	0.332	2.4	0.345
0.345	4.6	0.286	5.1	0.285	5.4	0.366	4.7	0.361	2.9	0.332	2.6	0.441
0.379	4.6	0.286	5.1	0.285	5.4	0.366	4.8	0.407	2.9	0.332	2.6	0.441
0.414	4.8	0.359	5.3	0.364	5.4	0.366	4.8	0.407	3.1	0.422	2.6	0.441
0.448	4.8	0.359	5.3	0.364	5.5	0.408	4.8	0.407	3.2	0.470	2.7	0.492
0.483	5.1	0.485	5.3	0.364	5.6	0.451	4.9	0.456	3.2	0.470	2.8	0.543
0.517	5.2	0.530	5.4	0.408	5.6	0.451	4.9	0.456	3.3	0.518	2.9	0.594
0.552	5.2	0.530	5.4	0.408	5.7	0.495	5.0	0.506	3.3	0.519	2.9	0.594
0.586	5.2	0.530	5.4	0.408	5.7	0.495	5.0	0.506	3.4	0.568	2.9	0.594
0.621	5.2	0.530	5.6	0.501	5.8	0.541	5.0	0.506	3.4	0.568	3.0	0.643
0.655	5.2	0.530	5.9	0.649	5.9	0.588	5.1	0.558	3.4	0.568	3.0	0.643
0.690	5.2	0.530	5.9	0.649	5.9	0.588	5.1	0.558	3.5	0.617	3.0	0.643
0.724	5.3	0.564	6.0	0.697	5.9	0.588	5.2	0.610	3.5	0.617	3.0	0.643
0.759	5.3	0.575	6.1	0.743	6.0	0.634	5.3	0.661	3.6	0.664	3.1	0.691
0.793	5.3	0.575	6.2	0.786	6.1	0.679	5.3	0.661	3.7	0.710	3.2	0.737
0.828	5.7	0.749	6.2	0.786	6.2	0.723	5.3	0.661	3.7	0.710	3.2	0.737
0.862	6.0	0.856	6.2	0.786	6.6	0.872	5.4	0.711	3.9	0.794	3.3	0.779
0.897	6.0	0.856	6.6	0.923	6.9	0.943	5.5	0.765	4.1	0.863	3.3	0.779
0.931	6.6	0.973	6.7	0.941	7.4	0.992	6.6	0.996	4.6	0.966	3.6	0.882
0.966	7.9	0.9999	7.9	0.9999	7.7	0.999	7.2	0.9999	5.7	0.9999	4.6	0.997
α	6.58		7.81		7.49		7.34		4.62		3.99	
β	5.427		5.86		5.99		5.24		3.53		2.98	

Distribución empírica: $\frac{m}{N+1}$ donde m: Número de orden y N: Número de datos

Distribución Weibull con parámetros obtenidos mediante el análisis de regresión, α es el parámetro de forma y β es el parámetro de escala.

Tabla 3-5. Distribución Weibull (D-W) de probabilidades (julio-diciembre). Período 1977-2001

Distribución	JUL		AGOS		SEP		OCT		NOV		DIC	
Prob. Empírica	VEL	D-W	VEL	D-W								
0.034	1.3	0.017	1.8	0.040	1.2	0.030	1.1	0.028	1.8	0.060	2.7	0.1288
0.069	1.8	0.066	1.9	0.053	1.3	0.042	1.4	0.084	1.8	0.060	2.8	0.1464
0.103	2.2	0.149	2.2	0.110	1.8	0.163	1.5	0.114	2.0	0.102	2.9	0.1655
0.138	2.3	0.177	2.3	0.137	2.0	0.245	1.6	0.151	2.1	0.130	3.2	0.2315
0.172	2.5	0.243	2.4	0.167	2.0	0.245	1.7	0.196	2.3	0.202	3.3	0.2563
0.207	2.5	0.243	2.7	0.286	2.1	0.294	1.8	0.248	2.4	0.246	3.3	0.2563
0.241	2.7	0.321	2.7	0.286	2.1	0.294	1.8	0.248	2.4	0.246	3.3	0.2563
0.276	2.7	0.321	2.8	0.335	2.2	0.348	1.9	0.307	2.5	0.295	3.4	0.2823
0.310	2.9	0.408	2.8	0.335	2.2	0.348	2.0	0.373	2.5	0.295	3.5	0.3096
0.345	2.9	0.408	2.9	0.387	2.2	0.348	2.0	0.373	2.5	0.295	3.5	0.3096
0.379	2.9	0.408	2.9	0.387	2.3	0.405	2.0	0.373	2.6	0.350	3.6	0.338
0.414	3.0	0.454	3.0	0.441	2.3	0.405	2.0	0.373	2.6	0.350	3.8	0.3976
0.448	3.0	0.454	3.0	0.441	2.3	0.405	2.1	0.445	2.7	0.409	3.8	0.3976
0.483	3.1	0.502	3.1	0.499	2.4	0.465	2.2	0.497	2.7	0.409	3.8	0.3976
0.517	3.1	0.502	3.1	0.499	2.4	0.465	2.2	0.519	2.8	0.471	3.9	0.4285
0.552	3.2	0.550	3.1	0.499	2.4	0.465	2.2	0.519	2.9	0.503	3.9	0.4285
0.586	3.2	0.550	3.2	0.557	2.4	0.465	2.2	0.519	3.0	0.579	3.9	0.4285
0.621	3.3	0.592	3.2	0.557	2.4	0.465	2.2	0.519	3.0	0.599	4	0.46
0.655	3.3	0.597	3.4	0.672	2.6	0.588	2.2	0.538	3.2	0.723	4	0.46
0.690	3.4	0.644	3.4	0.672	2.7	0.649	2.4	0.667	3.2	0.723	4.1	0.4918
0.724	3.4	0.644	3.4	0.672	2.7	0.649	2.5	0.737	3.2	0.723	4.3	0.5559
0.759	3.5	0.689	3.5	0.726	2.8	0.707	2.5	0.737	3.2	0.723	4.3	0.5559
0.793	3.6	0.733	3.5	0.726	2.8	0.707	2.5	0.737	3.3	0.779	4.407	0.5899
0.828	3.6	0.733	3.5	0.726	3.0	0.810	2.6	0.799	3.4	0.829	4.5	0.6191
0.862	3.7	0.773	3.6	0.776	3.0	0.810	2.7	0.853	3.4	0.829	5.2	0.8126
0.897	3.8	0.810	3.6	0.776	3.4	0.943	2.8	0.897	3.4	0.829	5.3	0.8347
0.931	4.2	0.922	4.3	0.977	3.5	0.962	2.8	0.897	3.8	0.958	6.6	0.9843
0.966	4.7	0.984	4.6	0.995	3.6	0.975	3.4	0.997	4.2	0.995	9.3	0.9999
α	4.26		5.18		4.37		4.69		5.26		3.81	
β	3.37		3.32		2.67		2.35		3.05		4.54	

Distribución empírica: $\frac{m}{N+1}$ donde m: Número de orden y N: Número de datos

Distribución Weibull con parámetros obtenidos mediante el análisis de regresión, α es el parámetro de forma y β es el parámetro de escala.

Tabla 3-6. Prueba de Bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov. Valores de la estadística Dm*

Estación: Aeropuerto Ernesto Cortissoz (Atlántico)
Mes: Mayo (1977-2001).

MES	DISTRIBUCIÓN WEIBULL
ENERO	0.218
FEBRERO	0.178
MARZO	0.137
ABRIL	0.166
MAYO	0.117
JUNIO	0.118
JULIO	0.098
AGOSTO	0.120
SEPTIEMBRE	0.156
OCTUBRE	0.117
NOVIEMBRE	0.074
DICIEMBRE	0.208

Dm*: máxima diferencia absoluta entre la probabilidad empírica y teórica.

El modelo probabilístico Weibull presenta en los meses de enero y diciembre las mayores desviaciones con respecto a la distribución empírica. En general, es aceptable el ajuste del modelo a un nivel de significación del 5%.

Determinación de los intervalos de probabilidad: Los intervalos de la probabilidad empírica que definen situación de normalidad se encuentran entre el 30 y 70% y sus valores oscilan entre el decil 3 y el decil 7, es decir, entre 2.86 y 3.5 m/s. Los valores inferiores y superiores a este intervalo indican situación de anormalidad.

Así mismo, los intervalos de la probabilidad, según la distribución Weibull, que definen situación de normalidad, se encuentran entre el 30 y 70% y sus valores oscilan entre los deciles 3 y 7, es decir, entre 2.82 y 3.68 m/s, como se muestra en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Intervalos de probabilidad de velocidad del viento (m/s)

Estación: Aeropuerto Ernesto Cortissoz (Atlántico)
Mes: Mayo (1977-2001).

Deciles	Distr. Empírica	Distr. Weibull
1	2.26	2.17
2	2.51	2.55
3	2.86	2.82
4	3.02	3.05
5	3.24	3.26
6	3.40	3.47
7	3.50	3.68
8	3.70	3.92
9	4.15	4.24

3.6 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS ALFA Y BETA

A continuación, en la Tabla 3-8, se presentan valores de los parámetros de forma (α) y escala (β) para algunos lugares de Colombia, donde el periodo de la información presentó pocos vacíos en los datos, y aseguró confianza en el resultado.

Tabla 3-8. Parámetros alfa (α) y beta (β) para algunas estaciones de viento del país

NOMBRE ESTACIÓN	DPTO.	PERÍODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
APTO. V. COBO	AMAZONAS	1987-1996												
		α	7.39	8.11	10.90	11.89	6.20	7.57	7.35	7.21	6.05	4.69	7.95	6.53
		β	1.20	1.17	1.14	1.06	1.04	1.04	1.11	1.11	1.17	1.22	1.12	1.18
APTO. LOS CEDROS	ANTIOQUIA	1983-1993												
		α	6.51	9.13	9.38	11.12	10.39	13.22	12.75	11.10	9.91	8.90	13.40	6.17
		β	2.78	3.12	3.21	2.62	1.94	1.66	1.84	1.81	1.95	2.24	1.98	2.37

NOMBRE ESTACIÓN	DPTO.	PERIODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
APTO. O. HERRERA	ANTIOQUIA	1991-2004												
		α	17.07	12.91	12.37	19.01	18.00	17.89	16.08	16.08	14.66	15.34	12.81	14.67
		β	2.79	2.74	2.78	2.51	2.46	2.53	2.70	2.70	2.56	2.39	2.44	2.55
TULIO OSPINA	ANTIOQUIA	1982-1991												
		α	8.70	9.31	8.65	8.08	8.77	8.47	11.18	6.62	6.68	9.85	8.44	13.69
		β	3.41	3.20	3.14	2.90	2.88	2.89	3.10	2.86	2.81	2.43	2.73	3.06
LA SELVA	ANTIOQUIA	1981-1992												
		α	6.91	4.80	5.33	5.76	8.65	6.57	6.96	5.80	5.74	5.07	5.26	5.27
		β	1.57	1.66	1.65	1.51	1.49	1.73	1.94	1.87	1.74	1.39	1.35	1.42
REPELÓN	ATLÁNTICO	1981-2002												
		α	12.39	14.70	17.17	15.35	11.76	16.80	13.73	11.76	11.14	10.25	8.11	6.57
		β	3.03	3.16	3.12	2.86	2.28	2.15	2.37	2.34	2.14	2.02	2.18	2.76
APTO. E. CORTISSOZ	ATLÁNTICO	1986-2004												
		α	10.61	9.77	9.07	12.11	6.25	4.56	3.76	4.77	3.99	4.30	5.23	5.75
		β	4.91	5.48	5.62	4.96	3.47	3.04	3.36	3.31	2.66	2.40	2.96	4.02
LAS FLORES	ATLÁNTICO	1985-1994												
		α	5.94	5.71	5.74	6.86	4.97	5.55	8.63	5.07	7.25	5.85	6.07	5.11
		β	9.05	9.00	9.51	7.73	5.52	5.25	6.61	5.45	4.33	4.26	5.75	9.02
APTO. EL DORADO	BOGOTÁ D. C.	1981-2003												
		α	5.57	5.67	6.63	7.62	6.77	7.03	5.23	5.11	6.09	4.64	5.65	6.76
		β	2.30	2.42	2.43	2.18	2.34	2.65	2.89	2.82	2.28	2.18	2.16	2.20
CARMEN DE BOLÍVAR	BOLÍVAR	1982-1991												
		α	18.77	12.36	20.68	12.61	14.16	13.64	17.28	12.45	15.15	15.43	15.11	9.10
		β	1.92	2.17	2.20	2.08	1.79	1.75	1.93	1.88	1.76	1.65	1.61	1.82
VILLA CARMEN	BOYACÁ	1992-2004												
		α	9.67	9.62	15.58	13.86	11.38	10.80	10.16	8.92	11.12	11.16	11.49	10.27
		β	4.01	4.08	3.85	3.90	4.37	4.92	5.19	5.30	4.52	3.93	3.66	3.97
SURBATA BONZA	BOYACÁ	1993-2004												
		α	5.25	4.40	5.16	5.19	5.65	5.89	4.65	4.13	8.89	5.62	5.02	5.52
		β	1.99	1.98	1.99	1.73	1.60	1.71	1.95	2.05	1.63	1.64	1.75	1.82
U. P. T. C.	BOYACÁ	1982-2004												
		α	18.79	13.97	13.19	17.58	18.79	13.20	12.00	12.66	13.34	15.33	13.20	15.30
		β	2.27	2.54	2.46	2.35	2.27	2.57	2.73	2.73	2.52	2.28	2.20	2.22

NOMBRE ESTACIÓN	DPTO.	PERIODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
BELENKITO	BOYACÁ	1996-2004												
		α	6.62	7.97	7.30	6.99	6.63	6.28	6.67	8.12	10.16	7.77	7.84	9.15
		β	2.10	2.15	1.91	1.92	1.88	2.11	2.11	2.12	1.84	1.78	1.81	2.01
S. NEVADA COCUY	BOYACÁ	1981-1989												
		α	22.94	12.17	12.18	28.75	15.64	11.06	10.22	6.35	14.65	8.28	18.25	17.18
		β	2.65	2.78	2.68	2.41	2.40	2.71	3.06	2.82	2.56	2.28	2.19	2.59
NARANJAL	CALDAS	1987-2002												
		α	7.20	6.66	7.73	6.72	6.38	7.11	5.63	6.13	5.51	6.54	6.39	6.21
		β	1.64	1.66	1.67	1.61	1.52	1.55	1.63	1.63	1.65	1.66	1.61	1.61
CENICAFÉ	CALDAS	1991-2004												
		α	10.46	10.08	11.41	11.76	9.87	8.47	10.29	9.42	9.46	6.35	10.20	8.44
		β	1.69	1.73	1.66	1.59	1.56	1.62	1.63	1.74	1.56	1.71	1.59	1.64
VALENCIA	CAQUETÁ	1995-2004												
		α	6.52	5.49	5.84	5.71	7.33	5.98	4.26	7.44	4.25	6.01	9.35	8.66
		β	2.47	2.46	2.22	2.40	2.54	2.78	3.16	3.50	2.61	2.46	2.26	2.32
MOTILONIA	CESAR	1998-2002												
		α	8.52	4.73	6.71	7.46	7.38	8.78	8.85	10.49	9.15	8.68	9.54	6.01
		β	2.89	3.43	2.95	2.49	2.22	2.12	2.23	2.19	2.06	1.91	1.91	2.11
TURIPANA	CÓRDOBA	1981-1997												
		α	6.43	6.12	6.05	5.25	8.09	9.21	15.38	10.76	10.46	8.51	8.97	11.52
		β	1.67	2.01	2.34	2.07	1.55	1.37	1.41	1.48	1.40	1.40	1.28	1.27
APTO. LOS GARZONES	CÓRDOBA	1989-2003												
		α	10.29	8.47	7.97	8.19	14.57	13.74	15.00	7.22	10.57	12.54	9.78	7.73
		β	1.48	1.86	2.15	1.90	1.47	1.38	1.59	1.46	1.41	1.33	1.31	1.26
TIBAITATÁ	C/MARCA.	1981-2004												
		α	7.12	6.78	7.75	6.79	7.75	6.04	6.49	5.26	8.03	6.70	7.19	8.01
		β	1.99	2.02	2.01	1.86	2.01	2.31	2.46	2.58	2.17	1.86	1.74	1.82
P. ARQUEO-LÓGICO	HUILA	1985-2004												
		α	20.11	16.94	18.93	19.29	20.07	22.61	17.76	20.03	20.86	23.30	18.15	20.09
		β	2.08	2.07	2.00	1.94	1.90	1.91	1.93	1.97	2.11	2.04	1.98	2.05
LOS ROSALES	HUILA	1994-2004												
		α	5.72	5.28	8.58	5.48	5.48	5.67	5.76	6.47	5.80	8.71	6.91	8.64
		β	2.08	2.25	2.13	4.57	2.85	3.41	4.19	4.78	3.51	2.73	2.00	1.93

NOMBRE ESTACIÓN	DPTO.	PERIODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
SAN ALFONSO	HUILA	1994-2004												
		α	9.26	7.51	7.50	7.55	6.97	8.13	6.98	8.55	7.42	9.61	8.04	5.36
		β	2.46	2.56	2.37	2.05	2.20	2.30	2.72	2.99	2.69	2.74	2.40	2.13
PUERTO BOLÍVAR	LA GUAJIRA	1986-2004												
		α	7.55	8.69	8.68	16.68	9.53	18.79	15.04	8.48	5.67	5.27	7.35	8.82
		β	7.62	7.98	8.02	7.59	7.62	8.16	8.45	8.03	6.41	5.79	6.01	6.76
LA LIBERTAD	META	1987-2000												
		α	9.53	8.92	6.17	8.11	7.58	8.84	8.94	9.64	11.01	8.26	15.91	10.76
		β	1.98	1.91	1.74	1.56	1.47	1.50	1.48	1.48	1.50	1.49	1.58	1.72
EL ENCANO	NARIÑO	1987-2004												
		α	7.76	8.47	5.09	13.35	6.84	4.57	7.66	5.62	6.68	11.25	6.60	7.40
		β	2.01	1.83	1.97	1.77	2.03	2.46	2.72	2.80	2.20	1.99	2.10	1.97
OBONUCO	NARIÑO	1981-2004												
		α	7.67	8.22	10.71	9.09	12.44	7.21	8.92	9.28	7.53	9.70	10.57	10.62
		β	3.44	3.48	3.24	3.23	3.46	4.15	4.64	4.82	4.17	3.48	3.23	3.12
APTO A. NARIÑO	NARIÑO	1994-2003												
		α	7.16	6.45	8.74	6.88	7.69	9.84	8.49	5.66	6.25	8.42	6.09	8.10
		β	2.42	2.59	2.30	2.32	2.38	2.56	3.17	3.64	2.88	2.82	2.51	2.47
APTO. C. DAZA.	NORTE DE SANTANDER	1981-2004												
		α	3.69	3.05	3.75	3.68	4.14	3.37	4.41	3.76	3.95	3.65	3.09	3.27
		β	2.48	2.54	2.48	2.67	3.62	5.57	5.94	5.27	3.92	3.06	2.33	2.40
CENTRO A. ÁBREGO	NORTE DE SANTANDER	1981-1994												
		α	18.47	20.59	16.57	16.13	12.88	10.01	17.39	10.56	17.46	23.66	14.40	19.55
		β	2.57	2.61	2.68	2.52	2.39	2.71	2.81	2.70	2.47	2.30	2.38	2.45
LA CAMELIA	RISARALDA	1992-2003												
		α	6.95	8.01	9.90	15.28	13.67	11.40	16.53	10.27	8.26	12.70	12.09	9.49
		β	2.39	2.34	2.29	2.02	1.93	1.98	2.17	2.37	2.30	2.08	1.93	1.97
APTO. EL EMBRUJO	S. ANDRÉS	1985-2004												
		α	6.74	6.85	5.75	6.67	5.59	6.23	12.85	4.95	4.26	4.30	5.55	8.42
		β	4.29	4.13	3.95	3.84	3.79	4.56	4.54	4.12	2.95	2.96	3.63	4.18
EL CUCHARO	SANTANDER	1985-2000												
		α	8.92	8.33	12.14	12.67	12.30	11.98	15.42	10.56	9.79	8.03	8.78	10.38
		β	2.07	2.17	2.11	1.98	1.73	1.68	1.71	1.70	1.79	1.62	1.65	1.78

NOMBRE ESTACIÓN	DPTO.	PERÍODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
GRANJA TINAJA	SANTANDER	1996-2004												
		α	9.03	8.89	13.15	8.75	10.01	9.94	9.74	9.68	10.88	9.03	6.36	11.91
		β	1.43	1.45	1.42	1.32	1.37	1.46	1.57	1.51	1.26	1.27	1.31	1.36
APTO. PALO-NEGRO	SANTANDER	1981-2004												
		α	9.54	9.32	9.69	13.80	10.24	8.70	8.58	11.09	11.27	10.53	11.11	12.20
		β	2.95	3.01	2.96	2.90	2.93	2.87	2.96	3.02	3.12	2.98	2.82	2.78
APTO. YARIGUÍES	SANTANDER	1985-2004												
		α	14.02	15.64	13.69	18.16	20.73	18.83	17.89	17.73	17.89	16.63	15.33	16.00
		β	1.68	1.77	1.79	1.77	1.74	1.70	1.79	1.86	1.85	1.77	1.65	1.57
NATAIMA	TOLIMA	1981-2003												
		α	8.26	9.94	7.26	11.06	14.35	9.45	8.51	8.06	8.03	10.89	10.73	10.80
		β	2.31	2.44	2.54	2.31	2.21	2.37	2.87	3.19	2.89	2.44	2.16	2.06
APTO. PERALES	TOLIMA	1991-2002												
		α	13.53	11.06	8.61	8.46	10.95	5.48	7.45	6.82	6.50	6.54	9.82	6.78
		β	1.57	1.59	1.60	1.56	1.49	1.82	2.01	2.22	1.76	1.60	1.35	1.46
COLPUERTOS	VALLE	1988-1998												
		α	9.47	6.43	5.86	6.36	8.06	6.91	6.59	7.66	6.52	8.40	8.24	8.59
		β	1.58	1.51	1.46	1.53	1.46	1.51	1.53	1.57	1.63	1.55	1.56	1.57
CENTRO A. LA UNIÓN	VALLE	1982-1993												
		α	7.17	8.51	5.65	6.19	7.54	9.73	10.12	8.28	6.24	8.10	6.45	7.59
		β	1.66	1.77	1.69	1.54	1.32	1.37	1.57	1.76	1.71	1.50	1.50	1.46
PALMIRA ICA	VALLE	1994-2004												
		α	11.12	8.09	10.23	10.97	9.92	12.36	19.81	10.68	9.48	10.42	14.85	13.92
		β	1.53	1.55	1.49	1.32	1.24	1.31	1.45	1.66	1.67	1.53	1.39	1.43
LAS GAVIOTAS	VICHADA	1993-2004												
		α	8.19	5.18	4.52	6.48	8.54	10.26	6.11	6.51	8.37	8.70	6.47	8.62
		β	2.40	2.30	1.73	1.37	1.21	1.25	1.28	1.32	1.29	1.29	1.57	1.87

BIBLIOGRAFÍA

1. Gómez, V. and Maravall (1996). 'Programs tramo and seat'. Instruction for the User, Banco de España, Servicio de Estudios, Documento de Trabajo No. 9628.
2. Guerrero, V. (1991). 'Análisis de Series de Tiempo Económicas' Universidad Autónoma Metropolitana, México, Colección CBI.
3. Nieto, Fabio H. Predicción de datos faltantes en series temporales usando métodos de regresión, investigación desarrollada para el Ideam, contrato No. 037/98.
4. Aguirre, Jaime (1994). Introducción al Tratamiento de Series Temporales. Escuela Nacional de Sanidad. Madrid, España.
5. Santillán Campos, Tirso (2001). Problemario de pronósticos para la toma de decisiones. Thomson-Learning. México, D. F.
6. Canavos, George (1988). Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y métodos. Editorial McGraw-Hill / Interamericana de México, S. A. - de C. V. México.
7. Benjamín, Jack R. (1981). Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil. Editorial McGraw-Hill / Latinoamericana S. A. Colombia.
8. W.J., Gibbs. Definiendo el Clima. Revista oficial de Organización Meteorológica Mundial, OMM, volumen 36, No. 4, Octubre de 1987.
9. Organización Meteorológica Mundial, Guía de Prácticas Climatológicas, OMM No. 100, Ginebra, Suiza, 1990.
10. Lysen, E. H. (1983). Introduction to Wind Energy. Consultancy Services Wind Energy Developing Countries. P. O. Box 85 3800 AB Amersfoort The Netherlands.
11. Socolmet, Ideam (1996). IV Congreso Colombiano de Meteorología. Memorias. "La variabilidad y el cambio climático y su impacto socioeconómico" Bogotá, D. C.