

1

2

3 **SENSIBILIDAD DEL EFECTO DE ESTELA A LA ESTABILIDAD DE**  
4 **LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA EN UN PARQUE EÓLICO**  
5 **ONSHORE DE LA PATAGONIA ARGENTINA**

6

7 **Gonzalo Pablo Navarro Diaz <sup>1,2</sup>, María Laura Mayol <sup>1,2</sup>, Andrea Celeste Saulo <sup>1,3</sup> y**  
8 **Alejandro Daniel Otero <sup>4,2</sup>**

9

10 <sup>1</sup>**Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA.**

11 <sup>2</sup>**Centro de Simulación Computacional para Aplicaciones Tecnológicas,**  
12 **CSC-CONICET.**

13 <sup>3</sup>**Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.**

14 <sup>4</sup>**Facultad de Ingeniería, UBA.**

15

16 **Autor correspondiente: Alejandro D. Otero, [alejandro.otero@csc.conicet.gov.ar](mailto:alejandro.otero@csc.conicet.gov.ar)**

17

18 Manuscrito recibido el 30 de marzo de 2020, en su versión final el 22 de septiembre de 2020

19

20

## RESUMEN

21 En este trabajo se presenta un estudio de sensibilidad de la estela que se produce detrás de  
22 los aerogeneradores ante los distintos regímenes de estabilidad presentes en la capa límite  
23 atmosférica. Este análisis se lleva a cabo sobre un extenso registro de mediciones en uno  
24 de los parques eólicos más grandes de Argentina emplazado sobre tierra en la región  
25 patagónica. Se analizan datos tanto del período previo a su construcción como durante su  
26 etapa productiva. El enfoque resulta novedoso al analizar la dependencia del impacto  
27 negativo de la estela sobre la producción en función de los distintos regímenes de  
28 estabilidad que se desarrollan a lo largo del día y estacionalmente. Los resultados  
29 coinciden con las tendencias reportadas por otros autores, encontrando una disminución  
30 notable de la estela, y una mejora de la producción asociada, durante condiciones

31 inestables. El menor impacto de las estelas se registra durante el verano en las horas del  
32 medio día, donde se dan típicamente estas condiciones. Contrariamente para condiciones  
33 estables, que ocurren generalmente durante la noche, el impacto de las estelas es mayor. El  
34 comportamiento promedio en general se aproxima a la condición neutral.

35

36 **Palabras clave:** energía eólica, efecto estela, capa límite atmosférica, regímenes de  
37 estabilidad.

38

39 **SENSITIVITY OF THE WAKE EFFECT TO THE ATMOSPHERIC**  
40 **BOUNDARY LAYER STABILITY IN AN ONSHORE WIND FARM IN**  
41 **THE ARGENTINEAN PATAGONIA**

42

43

**ABSTRACT**

44 In this work, a sensitivity study of the downstream wakes produced by wind turbines for  
45 different stability regimes in the atmospheric boundary layer is presented. The analysis is  
46 made on an extensive measurement data set of one of the largest onshore wind farms  
47 located in the Patagonian region of Argentina. Data from periods before the construction  
48 and during production of the park are analyzed. The novelty of the approach is the  
49 analysis of the negative wake impact on production and its dependence on the different  
50 stability regimes in the day and seasonal cycles. The outcomes coincide with the trends  
51 reported by other authors, finding a notable decrease in the wake impact during unstable  
52 conditions. The smallest impact is found during the summer at midday hours, when  
53 typically unstable conditions appear. On the contrary, during stable conditions, which  
54 generally occur at night, the impact is higher. The typical behavior of the park is in  
55 general close to the neutral condition.

56

57 **Key Words:** wind energy, wake effect, atmospheric boundary layer, stability.

58

59

**60 1) INTRODUCCIÓN**

61 El comportamiento de la parte de la atmósfera en contacto con la superficie terrestre, de-  
62 nominada capa límite atmosférica (CLA), es muy importante para la energía eólica. Esto  
63 es debido a que la zona de barrido de las aspas de los aerogeneradores abarca desde los  
64 primeros metros sobre la superficie terrestre hasta alturas de punta de pala de entre 200 y  
65 300 m. Este comportamiento tiene efecto sobre uno de los fenómenos más relevantes en el  
66 diseño y cálculo de la producción de los parques eólicos, el efecto de estela, el cual se pro-  
67 duce aguas abajo de los aerogeneradores y tiene un impacto negativo en la producción  
68 (Navarro Diaz et al., 2019). Cuando el aire fluye a través de una turbina, ésta extrae ener-  
69 gía del viento, produciendo una estela detrás de sí. Estas estelas se caracterizan por una re-  
70 ducción de la intensidad del viento y un aumento de la turbulencia. Si las estelas impactan  
71 total o parcialmente en otros aerogeneradores ubicados aguas abajo, la producción de  
72 energía en los mismos se verá reducida. Además, las condiciones de velocidad no homo-  
73 géneas y la mayor turbulencia dentro de las estelas, disminuye la vida útil de aquellos  
74 aerogeneradores afectados.

75 La intensidad del efecto de estela depende tanto de las características estructurales y  
76 operativas de los aerogeneradores como así también de las condiciones turbulentas  
77 presentes en la CLA. Estos factores hacen que tanto su intensidad como su longitud aguas  
78 abajo varíe considerablemente. Si bien los aprovechamientos de la energía eólica  
79 generalmente corresponden a ubicaciones con recursos de vientos fuertes, donde la  
80 turbulencia tiene un origen predominantemente mecánico, eso no significa necesariamente  
81 que se puedan ignorar los efectos de origen térmicos, y varios autores han estudiado la  
82 influencia de la estabilidad atmosférica en las características de estela. Por ejemplo,  
83 Schepers et al. (2012) llevaron a cabo un análisis de sensibilidad de las estelas de un  
84 parque eólico sobre mar (*offshore*) para diferentes regímenes de estabilidad de la CLA,  
85 encontrando que para las condiciones estables, típicas durante la noche, la estela se  
86 mantiene intensa a lo largo de grandes distancias aguas abajo. Contrariamente, en  
87 condiciones inestables, generalmente alrededor del medio día, la mayor intensidad en la  
88 mezcla de la CLA acelera el desvanecimiento de la estela, reduciendo su impacto.

89 En la literatura se encuentran diferentes estudios del impacto de la estabilidad de la CLA  
90 sobre parques *offshore*. En cambio, los estudios sobre el impacto de dicho fenómeno en  
91 parques sobre tierra, (*onshore*), son escasos. Recientemente, Doubrawa et al. (2019)  
92 analizaron mediciones LIDAR del viento detrás de un solo aerogenerador para tres  
93 condiciones de estabilidad: cercana a la neutralidad, ligeramente inestable y muy estable.  
94 Por otro lado, en el trabajo de Han et al. (2018) se midió el perfil de la estela de un  
95 aerogenerador mediante dos mástiles meteorológicos provistos de anemómetros de  
96 coperolas a distintas alturas. Además, utilizaron un anemómetro sónico para estimar la  
97 estabilidad, pudiendo separar las mediciones de estela para los regímenes estable,  
98 inestable y neutral. Al igual que sucede en parques *offshore*, los autores de ambos trabajos  
99 encuentran que para condiciones inestables la estela se disuelve a distancias más cortas  
100 que para condiciones neutrales. Contrariamente, para condiciones muy estables la estela se  
101 mantiene intensa en una distancia mucho mayor aguas abajo y su ancho se mantiene  
102 constante. Ante este panorama, el estudio de la estabilidad sobre los parques *onshore*  
103 cobra una gran importancia, especialmente en Argentina, donde todos los parques eólicos  
104 actuales y previstos en el corto y mediano plazo serán construidos sobre tierra.

105 Es por ello que en este trabajo se propone analizar la interacción de estelas entre varios  
106 aerogeneradores en un parque eólico *onshore* bajo la influencia de las diferentes  
107 estabilidades atmosféricas asociadas al ciclo diurno y su variación estacional. Este análisis  
108 se lleva a cabo empleando las mediciones típicamente disponibles en un parque operativo:  
109 las variables registradas en el mástil meteorológico y la potencia de los aerogeneradores,  
110 consecuentemente, el cálculo de estabilidad será aproximado según los parámetros  
111 existentes. Se aborda el caso particular del Parque Eólico Rawson, uno de los parques de  
112 gran tamaño más antiguos de Argentina del cual se cuenta con una serie extensa de  
113 mediciones.

114 Este trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se describe la metodología  
115 para determinar de manera local los regímenes de estabilidad y los conjuntos de datos de  
116 mediciones del parque eólico que se han utilizado. Posteriormente, en la sección 3, se  
117 analiza cómo la variabilidad de los regímenes de estabilidad en la cercanía de los

118 aerogeneradores influencia el desarrollo de la estela. Para ello, en una primera parte, se  
119 analizan las mediciones de viento antes de la construcción del parque, de las cuales se  
120 obtiene la distribución de los regímenes de estabilidad. Finalmente se trabaja con las  
121 mediciones de mástil meteorológico y potencia de los aerogeneradores en la etapa  
122 productiva del parque, con el fin de analizar el efecto de la estabilidad sobre las estelas a  
123 lo largo del ciclo diurno y para distintas estaciones del año.

124

## 125 2) MÉTODOS Y DATOS

### 126 2.1 Metodología

127 A lo largo del día se pueden registrar distintos regímenes de estabilidad de la CLA, los  
128 cuales se pueden dividir básicamente en tres: inestable, estable y neutral. Existen  
129 diferentes criterios para establecer el régimen en cada período de medición, los cuales  
130 incorporan una mayor o menor cantidad de variables y procesos atmosféricos (Sedefian y  
131 Bennett, 1980). El método más completo es el creado a partir de la Teoría de Semejanza  
132 de Monin-Obukhov (MOST) (Newman y Klein, 2014). De esta teoría se desprende el  
133 parámetro fundamental de estabilidad  $\zeta = L z$ , donde  $z$  [m] es la altura sobre el suelo y  $L$   
134 [m] la longitud de Monin-Obukhov. En función de este parámetro  $\zeta$  se definen los rangos  
135 de las distintas condiciones de estabilidad atmosférica. Lamentablemente, en la mayoría  
136 de los parques eólicos no se cuenta con mástiles meteorológicos con el instrumental  
137 preciso para la obtención de las variables necesarias para calcular dicho parámetro, a  
138 saber, los flujos turbulentos de cantidad de movimiento y calor. Un caso particular es el  
139 estudio de Cañadillas et al. (2011) realizado en el parque eólico *offshore* Alpha Ventus en  
140 Alemania, en donde se emplearon las mediciones de una plataforma marina experimental  
141 usando un anemómetro sónico.

142 Generalmente, los parques eólicos solo disponen de mástiles con anemómetros de  
143 coperolas, veletas y termómetros a varias alturas, y un barómetro. Estas alturas abarcan  
144 desde las cercanas al suelo hasta las equivalentes a la altura de góndola de los  
145 aerogeneradores, que es la altura del eje de rotación del rotor del aerogenerador (alrededor

146 de 80 a 100 m). Una alternativa para estimar la estabilidad atmosférica es a través del  
 147 número de Richardson bulk o por diferencias finitas ( $R_i$ ), que se obtiene a partir del  
 148 gradiente local de las mediciones promediadas en el mástil en períodos de 10 minutos. El  
 149  $R_i$  es un parámetro importante para la evaluación del efecto relativo de la estratificación  
 150 térmica y la variación del viento con la altura. Dentro de sus aplicaciones, es fundamental  
 151 para el transporte y dispersión de contaminantes a escalas locales y regionales (Stull,  
 152 2000). También se ha empleado para el estudio de la influencia de las condiciones de  
 153 estabilidad sobre las estelas de los aerogeneradores en parques *offshore* (Dörenkämper et  
 154 al., 2015). Este parámetro es un número adimensional y permite determinar la estabilidad  
 155 a partir de la relación entre la producción o consumo de turbulencia debida al empuje  
 156 térmico y la producción debida a los procesos friccionales con la superficie. Si se dispone  
 157 de la temperatura y la velocidad del viento a dos alturas distintas, por ejemplo una cercana  
 158 al suelo ( $z_1$ ) y otra al nivel de la góndola ( $z_2$ ), el valor de  $R_i$  se calcula según (Bodine et  
 159 al., 2009):

$$160 \quad R_i = \frac{g \Delta z_u^2 \left[ \frac{T_2 - T_1}{\Delta z_T} + \Gamma_d \right]}{T_1 [U_2 - U_1]^2} \quad (1)$$

161  
 162 Donde  $T_1, T_2$  [K] son las temperaturas medidas en los niveles inferior y superior de  
 163 medición de esta variable. De manera análoga,  $U_1$  y  $U_2$  [m/s] son las velocidades medidas  
 164 en los niveles inferior y superior de medición de esta variable y  $\Delta z_u$  y  $\Delta z_T$  son las  
 165 diferencias de altura [m] entre los niveles empleados para medir la velocidad y la  
 166 temperatura, respectivamente. Los niveles de medición de ambas variables deben  
 167 corresponderse lo mejor posible.  $\Gamma_d \approx 0.01$  [K/m] es la pendiente del perfil adiabático seco  
 168 y  $g$  la aceleración de la gravedad.

169 El número de  $R_i$  puede tomar valores negativos (CLA inestable), positivos (CLA estable)  
 170 o cercanos a cero (CLA neutral). En este trabajo se emplea la clasificación de los  
 171 regímenes de estabilidad en función de  $R_i$  sugerida en el estudio de Newman y Klein  
 172 (2014), según se especifica en la tabla I. Si bien en dicho trabajo utilizan niveles

173 diferentes, los límites del rango para atmósferas neutrales de Newman y Klein (2014) se  
 174 basan en el límite adoptado por Mauritsen y Svensson (2007) quienes trabajan con  
 175 diferentes combinaciones de niveles, algunas bastante más cercanas a las del presente  
 176 trabajo. Por otro lado, Dörenkämper et al. (2015) en una aplicación afín utilizando niveles  
 177 en alturas ligeramente mayores a las aquí utilizadas, definen el rango para la clasificación  
 178 neutral de la atmósfera como  $-0,15 < R_i < 0,15$ , es decir más amplio que el adoptado por  
 179 Newman y Klein (2014), lo que conduciría a clasificar más situaciones dentro del rango  
 180 neutral. Por último, cabe destacar que Newman y Klein (2014) quienes analizan la  
 181 estabilidad en una ubicación sobre tierra al igual que en este trabajo, obtienen resultados  
 182 consistentes a los presentados más adelante.

183 Como indicador del impacto de las estelas, se utiliza la relación de potencias medias entre  
 184 los aerogeneradores afectados y no afectados por estelas, de manera análoga al análisis de  
 185 Schepers et al. (2012):

$$186 \quad R_p = \frac{P_{T_1}}{P_{T_2}} \quad (2)$$

187

188 donde  $T_1$  es el aerogenerador afectado por las estelas aguas abajo y  $T_2$  aquel no afectado,  
 189 aguas arriba. Este indicador de impacto se evalúa para distintas direcciones de viento  
 190 entrante medidas en el mástil.

## 191 **2.2 Fuentes de mediciones**

192 En este estudio se hará foco en el Parque Eólico Rawson (PER). El mismo está emplazado  
 193 en la Patagonia Argentina a una altitud de 150 m y a 10 km de la costa. Este parque fue  
 194 construido en tres etapas; la primera fue inaugurada en octubre del 2011 y contó con 27  
 195 aerogeneradores Vesta V90, con una potencia nominal de 1,8 MW. La segunda etapa fue  
 196 terminada en enero del 2012, en la cual se sumaron 16 aerogeneradores de las mismas  
 197 características, llegando a un total de 77,4 MW. Por último, la tercer etapa fue inaugurada  
 198 en diciembre del 2017, agregando 12 aerogeneradores Vestas V100 de 2,0 MW cada uno.  
 199 En total suma 55 aerogeneradores y una capacidad instalada de 101,4 MW, siendo uno de  
 200 los parque eólicos más grande de Argentina.

201 Previo a la construcción del parque eólico, se llevó a cabo una valoración del recurso  
202 eólico en el terreno disponible, instalando una torre meteorológica en el centro del parque  
203 actual. Este mástil central funcionó desde octubre del 2010 hasta mediados de septiembre  
204 del 2011, un total de casi 1 año de mediciones continuas. El mismo estaba compuesto por  
205 tres anemómetros de coprolas NRG #40 (a 40, 60 y 80 m), dos veletas NRG #200P (78 y  
206 58 m), dos sensores de temperatura NRG #110S (a 3 y 79 m) y un barómetro NRGBP-20  
207 a 1 m. En cada instrumento se registraron mediciones promediadas en períodos de 10 min  
208 y, además, se cuenta con los valores del desvío estándar de la intensidad y de la dirección  
209 de viento en los mismos períodos. Con estas variables es posible el cálculo del número de  
210 Richardson bulk ( $R_i$ ) como indicador de la estabilidad de la CLA cercana a los  
211 aerogeneradores. Debido a que se dispone de la temperatura cercana al suelo y a la altura  
212 de góndola, pero la velocidad de viento solo a la altura de góndola, se decide emplear la  
213 formula de  $R_i$  asumiendo que  $U_1 = 0$  al no disponerse del dato en el nivel más bajo. Esta  
214 suposición podría dar como resultado una sobrestimación de la cortante vertical del viento  
215 y consecuentemente una subestimación del  $R_i$ .

216 Además de la información del estudio previo, en este trabajo se utilizan datos operativos  
217 del PER en sus dos primeras etapas. Hasta ese momento, el parque estaba compuesto de  
218 43 aerogeneradores Vestas V90, con una altura de góndola de 80 m y un diámetro del  
219 rotor  $D = 90$  m, distribuidos en 4 filas en dirección aproximadamente SO, separados a  $4D$   
220 dentro de la fila y a  $12D$  entre filas. Esto da al parque una dimensión total de  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ .  
221 Además, el parque cuenta con un mástil meteorológico localizado en la esquina NO y a  
222  $6D$  del rotor más cercano. El mismo se instaló posteriormente al estudio de prefactibilidad  
223 del parque, en febrero del 2011, desactivando el mástil central del estudio previo. La  
224 disposición de los aerogeneradores y el mástil meteorológico en el PER se muestra en la  
225 figura 1. A diferencia de la anterior torre central, este mástil cuenta con dos anemómetros  
226 VAISALA WAA151 (a 35 y 80 m), una veleta VAISALA WAA151 a 79 m y un sensor  
227 de temperatura y presión a 78 m. De esos dos anemómetros, se decide trabajar con el que  
228 está ubicado a 80 m, dado que corresponde a la altura de la góndola de los  
229 aerogeneradores. Al igual que en el mástil del estudio previo, en éste se registran las

230 variables promediadas en períodos diez-minutales. También se utiliza la intensidad  
231 turbulenta longitudinal ( $IT_u \equiv \frac{\sigma_u}{U}$ ) calculada en base al desvío estándar reportado por el  
232 anemómetro cada 10 min, lo cual es equivalente a considerar solo el desvío estándar de las  
233 componentes horizontales de la velocidad. La comparación entre esta intensidad  
234 turbulenta y la calculada en base a las tres componentes de la velocidad y su validez para  
235 determinar la estabilidad de la CLA fue realiza por Wharton y Lundquist (2012),  
236 demostrando que la  $IT_u$  se puede emplear como un indicador de la estabilidad atmosférica  
237 y de la mezcla de la estela.

238 Para el análisis de datos del mástil meteorológico durante el período de producción se  
239 eligió trabajar a partir de la etapa 2, abarcando desde comienzos de enero de 2012 hasta  
240 fin de abril de 2018 (6 años y 4 meses). De esta base de datos se descartó el período desde  
241 febrero del 2014 hasta julio 2015 inclusive (1 año y 6 meses) debido a que la empresa  
242 informa que los instrumentos del mástil estuvieron descalibrados. Con esta supresión de  
243 datos, se cuenta con un total de 4 años y 10 meses de mediciones. A estas mediciones se  
244 les aplicó un filtro para descartar los períodos de 10 minutos que tuvieran faltante de datos  
245 en alguno de los instrumentos de medición. Esto resulta en que finalmente se cuente con el  
246 93,4 % de los datos, aproximadamente 238 mil mediciones de 10 minutos cada una o un  
247 equivalente a 4 años y 7 meses. Cabe destacar que en el segundo capítulo de Waimann  
248 (2016), se efectuó un análisis de las características del viento en PER, pero su muestra fue  
249 acotada a un período total, antes de filtrar por faltantes de datos, de 2 años.

250 Para el análisis de la producción de los aerogeneradores se parte del mismo conjunto de  
251 datos filtrados de la torre meteorológica. Los aerogeneradores reportan mediante su  
252 sistema de control la potencia media generada en períodos diez-minutales. Se debieron  
253 descartar los datos a partir de julio del 2017, debido a que las curvas de potencia de todos  
254 los aerogeneradores fueron modificadas por el fabricante, aumentando su potencia  
255 nominal. De esta manera, los datos utilizados corresponden al período anterior a julio del  
256 2017 y, por lo tanto, todos los aerogeneradores tienen en todo momento la misma potencia  
257 nominal (1.8MW). Finalmente, se descartaron los períodos donde faltasen mediciones de

258 alguno de los aerogeneradores, contándose con aproximadamente 32 mil datos diez-  
259 minutales. En definitiva, el volumen total de datos, luego de filtrar las mediciones del  
260 mástil y de los aerogeneradores equivale a 1 año 7 meses.

261 Para analizar el impacto de estelas, se eligió trabajar con las mediciones de mástil  
262 meteorológico y producción de los cuatro aerogeneradores más cercanos al mismo (A6,  
263 A7, A8 y A9), figura 2, con el fin de lograr una buena correlación entre las mediciones del  
264 mástil y la producción. Los aerogeneradores A8 y A7 están separados a 4,7D (423 m) y se  
265 alinean para la dirección de viento  $320^\circ$ , quedando A7 afectado por la estela de A8. Otro  
266 caso de interferencia se puede identificar cuando A7 y A6 quedan dentro de la estela del  
267 A9. Los A7 y A6 están ubicados a 5,7D (513 m) y 10,5D (945 m) aguas abajo del A9 a lo  
268 largo de la dirección  $25^\circ$ .

269

### 270 3) RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

#### 271 3.1 Características de la distribución de velocidad y dirección

272 Una vez realizado el filtrado de los datos, se lleva a cabo el análisis de las mediciones de  
273 viento del mástil meteorológico del estudio previo y durante la etapa productiva del  
274 parque eólico, con el fin de obtener una caracterización de régimen de viento local. En la  
275 figura 3 se presentan las rosas de viento, generadas a partir de las mediciones en ambas  
276 etapas. Allí puede verse que el comportamiento general resulta equivalente. Como datos  
277 principales, se obtiene que los vientos predominantes tienen componente oeste, con una  
278 mayor frecuencia en la dirección  $282^\circ$  para el estudio previo y  $265^\circ$  durante el período  
279 productivo. Esta dirección predominante también fue registrada en el trabajo de Cúneo et  
280 al. (2018), en el cual se analizaron las mediciones a 10 m de una torre en la estación  
281 meteorológica que el Servicio Meteorológico Nacional posee en Trelew, ubicada a 18 km  
282 del PER. En la etapa productiva, cuando el viento sopla desde la dirección oeste, el mástil  
283 del parque se encuentra libre de la interferencia de la estela de los aerogeneradores, por lo  
284 que la influencia de este efecto es mínimo en el análisis de datos. Desafortunadamente  
285 para un cierto rango de direcciones ( $100^\circ$  a  $200^\circ$ ) el mástil se encuentra parcial o

286 totalmente interferido por la estela del parque, lo que corresponde en este caso a un 17,2%  
287 de los datos.

288 Se ha encontrado que la distribución de Weibull proporciona una buena representación de  
289 la variación en la velocidad del viento media por hora durante un año en muchos sitios  
290 típicos (Seguro y Lambert, 2000) y también vale para el PER en el período estudiado por  
291 Waimann (2016). Esta distribución toma la forma

$$292 \quad F(U) = \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right) \quad (3)$$

293

294 donde  $F(U)$  es la fracción de tiempo para la cual la velocidad media del viento por hora  
295 excede el valor de velocidad de viento  $U$ . Está caracterizada por dos parámetros, un  
296 parámetro de escala  $c$  y un parámetro de forma  $k$  que describe la variación alrededor de la  
297 media.  $c$  está relacionado con la velocidad media anual del viento  $\bar{U}$  a través de la relación

298

$$299 \quad \bar{U} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4)$$

300

301 donde  $\Gamma$  es la función gamma. En la figura 4 se muestran los histogramas de la velocidad  
302 de viento media por hora con los respectivos ajustes a la distribución Weibull para ambas  
303 etapas de estudio. Se verifica que el comportamiento general en ambas etapas resulta  
304 equivalente. Las respectivas velocidades promedio son de 8,19 m/s y 7,58 m/s a 80 m. Se  
305 registran con frecuencia casi nula valores de velocidad superiores a la velocidad de *cut-*  
306 *out* en la cual el aerogenerador se detiene por exceso de velocidad, y que para el caso del  
307 PER corresponde a 25 m/s. Estos resultados son consistentes con los de Waimann (2016),  
308 indicando que la frecuencia observada de los rangos entre 5 y 8 m/s exceden a los que  
309 representa la distribución teórica, aunque en términos generales, esta representa  
310 razonablemente bien el comportamiento observado.

### 311 **3.2 Regímenes de estabilidad en Rawson**

312 Con el objetivo de caracterizar los regímenes de estabilidad en la ubicación del PER, se

313 realiza el análisis de las mediciones del mástil meteorológico emplazado para  
314 confeccionar el estudio previo del recurso eólico. Este mástil cuenta con sensores de  
315 temperatura a dos alturas, lo cual resulta fundamental para la estimación de la estabilidad  
316 en la CLA utilizando el  $R_i$ . Las características generales del recurso observado en esta  
317 etapa se presentan en los paneles izquierdos de las figuras 3 y 4, donde se muestran  
318 respectivamente la rosa de vientos y la distribución de velocidades.

319 En la figura 5 (arriba) se muestra la distribución de casos en función del valor del  $R_i$ . Se  
320 puede observar que la mayoría de los datos se agrupan cerca de  $R_i=0$ , correspondiente al  
321 régimen neutral. Para valores menores o mayores a  $R_i=0$ , la distribución decae  
322 monótonamente. Con respecto a la distribución de categorías de estabilidad en función de  
323 la velocidad del viento a la altura de la góndola, en la figura 5 (abajo) podemos ver que  
324 para velocidades bajas, menores a 5 m/s, existe un predominio de las CLA  
325 extremadamente estables o inestables. Para velocidades más altas, las estabilidades  
326 cercanas a la neutralidad comienzan a tener una mayor preponderancia, mientras que para  
327 velocidades por encima de la velocidad nominal de los aerogeneradores instalados en PER  
328 1 y 2 (15 m/s) solo se registran regímenes neutrales. Entre las velocidades de 5 y 9 m/s  
329 existe una cantidad considerable de cada una de las 5 clases de estabilidades. Por esto, en  
330 la sección 3.3 se utilizará este rango de velocidades para el análisis de las estelas de los  
331 aerogeneradores bajo el efecto de las diferentes estabilidades.

332 Para tener una visión general, en la figura 6 se muestra la proporción del tiempo en que  
333 ocurre cada uno de los 5 regímenes de estabilidad. Se puede observar que  
334 aproximadamente la mitad del tiempo (56,1 %) se registra una CLA neutral, seguido por  
335 una mayor cantidad de casos estables (13,1 % + 17 % = 30,1 %) que de inestables (7,8 %  
336 + 6 % = 13,8 %). En la figura 7 se presenta el ciclo diario del promedio anual de  $R_i$  para  
337 cada hora. Los datos fueron seleccionados para el rango de velocidades de funcionamiento  
338 del aerogeneradores (de 4 a 25 m/s) con el fin de encontrar una relación con el  
339 comportamiento de la estela. Se puede observar que el valor de  $R_i$  tiende a tomar valores  
340 positivos (estables) durante el período nocturno (de 19 a 8 hs) y valores negativos  
341 (inestables) durante el período diurno (de 8 a 19 hs). Si tomamos el rango de horas durante

342 el cual todo el año es de noche (23 a 4 hs) o de día (11 a 16 hs), obtenemos valores  
343 promedio de  $R_i=0,17$  y  $R_i=-0,09$ , respectivamente.

344 Con el fin de profundizar el entendimiento de la dinámica de las estabilidades en el ciclo  
345 diurno, en la figura 8 se muestra la proporción de los 5 regímenes de estabilidad para cada  
346 hora, a partir de los mismos datos utilizados en la figura anterior. Se puede confirmar la  
347 tendencia a la estabilidad por la noche dado que en cerca del 45 % de las veces la  
348 estabilidad queda dentro de la clasificación neutral, y el resto es exclusivamente estable o  
349 muy estable con mayor frecuencia de esta última. En comparación, para el día la cantidad  
350 de casos neutrales es mayor al 50 %, resultando el resto de los casos inestables o muy  
351 inestables. Esta tendencia a la estabilidad durante el período nocturno y la inestabilidad  
352 durante el diurno será clave para el análisis de comportamiento de la estela en ambos  
353 rangos horarios. Este análisis de los regímenes a lo largo del ciclo diurno nos permite  
354 asumir que durante los dos rangos horarios seleccionados, nocturno y diurno, la CLA  
355 tendrá un comportamiento mayoritariamente estable o inestable, respectivamente,  
356 tendiendo el período inestable a un promedio más cercano a la neutralidad. Por esta razón,  
357 se emplea este criterio para analizar el efecto sobre las estelas en la próxima sección, dado  
358 que el mástil utilizado en la etapa operativa del PER no cuenta con instrumental que  
359 permita calcular el  $R_i$ .

### 360 **3.3 Efecto de estabilidad en la interacción de aerogeneradores**

361 A continuación, con el fin de analizar el efecto de los regímenes de estabilidad en las  
362 estelas de los aerogeneradores, se realizará una comparación de la relación de potencias  
363 (ecuación 2) para distintos aerogeneradores cuando se encuentran afectados por las estelas  
364 de uno o varios aerogeneradores aguas arriba. Los períodos nocturnos y diurnos se  
365 dividieron, además, entre los meses de verano (DEF) e invierno (JJA), con el fin de  
366 evaluar la influencia de los diferentes regímenes de estabilidad fuertemente estables e  
367 inestables sobre las estelas. Del conjunto de datos, se trabaja con las mediciones entre 5 y  
368 9 m/s, que corresponden al rango en el cual la velocidad está por encima del valor de  
369 arranque y el aerogenerador aplica el mismo efecto de resistencia sobre el fluido dado que  
370 el coeficiente de empuje  $C_T$  se mantiene aproximadamente constante. De esta manera, al

371 considerar velocidades para las cuales los aerogeneradores tienen el mismo  $C_T$ , el déficit  
372 de potencia que se produce sobre el aerogenerador afectado por la estela de aquellos aguas  
373 arriba será independiente de la velocidad en el mástil, pero sí dependerá de la estabilidad  
374 de la CLA. La dependencia respecto de este último factor será clave para el análisis de  
375 sensibilidad de las estelas a la estabilidad de la atmósfera.

376 Al reducir el rango de velocidades se modifican las proporciones de las diferentes  
377 estabilidades y el  $R_i$  promedio respecto del rango completo de velocidades de trabajo del  
378 aerogenerador referido en la sección anterior. En la tabla II se presentan los porcentajes de  
379 ocurrencia de veces en que se detectan las distintas estabilidades en el rango de  
380 velocidades entre 5 y 9 m/s durante los periodos diurno y nocturno. Claramente en el  
381 período diurno, la atmósfera es mayormente neutral con tendencia a la inestabilidad con  
382 un valor de  $R_i$  promedio de -0,11. Por otro lado, en el período nocturno prácticamente la  
383 mitad de las ocurrencias corresponden a situaciones neutrales y el resto tiende a ser estable  
384 resultando en un valor de  $R_i$  promedio de 0,21. Considerando el total de datos en el rango  
385 reducido de velocidades el comportamiento neutral resulta el más frecuente con tendencia  
386 a los regímenes estables, resultando un  $R_i$  promedio de 0,08.

387 En la figura 9 (arriba) se presenta la relación de potencias entre los aerogeneradores A7 y  
388 A8, mientras que en las figuras 9 (medio) y 9 (abajo) se muestra la relación de potencias  
389 de A7 con respecto a A9 y A6 con respecto a A9. Las mediciones fueron promediadas en  
390 direcciones cada  $4^\circ$  para un rango de  $\pm 25^\circ$  respecto de la dirección en que se alinean las  
391 turbinas. En los tres casos se puede observar que se repite el patrón de diferencias entre el  
392 impacto del período diurno y nocturno, identificando a la zona de máxima interferencia  
393 como la más sensible a estos cambios de estabilidades. En esa zona en particular, la  
394 diferencia promedio entre la relación de potencias para ambos períodos es del 16 % en la  
395 figura 9(arriba), y del 24 % para las figuras 9(medio) y 9(abajo).

396 Estos valores son similares a los hallados por (Schepers et al., 2012), quien encontró una  
397 diferencia del 20 % entre el día y la noche para dos aerogeneradores distanciados a 3,8D.  
398 Esta clara disminución en el máximo de interferencia en presencia de inestabilidades se ve

399 acompañado de un aumento de la dispersión angular de las curvas; esto sugiere que la  
400 mayor mezcla turbulenta estaría incrementando la dispersión horizontal de la estela,  
401 haciendo aumentar su ancho. Como una observación general, el período nocturno tiene un  
402 comportamiento similar al promedio general del día entero, con una relación de potencias  
403 ligeramente menor. Contrariamente, los resultados del período diurno se alejan mucho del  
404 promedio general, mostrando resultados de interferencias menores. Es importante notar  
405 que la diferencia entre los resultados se vuelve más marcada cuando los aerogeneradores  
406 se encuentran más distanciados unos de otros, como el caso de A7 y A9, o cuando se  
407 superpone el efecto de dos estelas como en el caso de A6 bajo el efecto de las estelas de  
408 A9 y A7. Estos cambios en la relación de potencias son debidos a que el impacto de estela  
409 depende de las condiciones de estabilidad en la CLA. Para atmósfera inestables,  
410 predominantemente cerca del medio día, la estela está sometida a una mayor mezcla,  
411 haciendo que su impacto sobre el aerogenerador aguas abajo sea más débil y su  
412 producción no se vea tan comprometida. A fin de ejemplificar el efecto de las distintas  
413 condiciones de estabilidad en la generación eólica, mencionaremos la situación particular  
414 en que el aerogenerador A7 se encuentra en la estela del aerogenerador A8 con viento de  
415 la dirección de  $R_p$  mínima. En esta situación, para una velocidad de 8 m/s (cerca al  
416 promedio del PER) el A8 entregaría una potencia de 880 kW. Mientras tanto el A7 en  
417 condiciones promedio entregaría un 58 % de esa potencia, es decir 510 kW. En la  
418 situación promedio del rango diurno, el A7 produciría un 73 % de la potencia de A8, es  
419 decir 642 kW, superando en 132 kW el caso promedio. Por otro lado, en la situación  
420 promedio del rango nocturno, el A7 entregaría un 53 % de la potencia de A8, es decir 466  
421 kW, una disminución de 44 kW respecto del caso promedio.

422 Debido a que el valor de mínima relación de potencias es el más sensible a los cambios de  
423 estabilidad, se estudiará su variación a lo largo del ciclo diurno a fin de analizar como éste  
424 afecta la interferencia de las estelas. Para evitar problemas debidos a la escasez de datos  
425 medidos en determinados momentos se utiliza como indicador de este valor mínimo de la  
426 relación de potencias el promedio de los valores en un rango de +/- 5° alrededor de la  
427 dirección en que se alinean ambas turbinas. En la figura 10 se muestra la evolución de la  
428 relación de potencias mínima del aerogenerador A7 respecto del A8 a lo largo del ciclo

429 diurno, separando el conjunto de datos entre los meses de invierno y verano. Se puede  
430 observar que durante el invierno la relación de potencias se mantiene con valor bajo a lo  
431 largo de todo el día. Contrariamente, durante el verano existe una gran diferencia entre las  
432 horas de noche y de día. En particular para las horas del medio día el impacto de la estela  
433 se vuelve muy débil, llegando la potencia del aerogenerador afectado a valores cercanos al  
434 95 % de la potencia del aerogenerador aguas arriba. Es necesario recordar que el indicador  
435 de la relación de potencias se calcula mediante el promedio del rango de +/- 5° alrededor  
436 de la dirección de máxima interferencia; por lo tanto, este valor podría ser menor en la  
437 dirección exacta de alineamiento de ambas turbinas.

438 Una forma de explicar esta gran variabilidad en el impacto de la estela es a través de la  
439 intensidad turbulenta  $IT_U$  medida en el anemómetro del mástil a 80 m. En la figura 11 se  
440 puede observar que este indicador de la turbulencia, a pesar de no considerar la  
441 turbulencia vertical, logra captar la variabilidad diurna y su distinción entre verano e  
442 invierno. Resulta notable como se repiten las características del comportamiento  
443 observado en las figuras 10 y 11 respecto del ciclo diurno y anual. De esta manera, se  
444 confirma que la variabilidad en el impacto de la estela es debida a la turbulencia, de origen  
445 mecánico y térmico, presente en la CLA.

#### 446 **4) CONCLUSIONES**

447 En este trabajo se llevó a cabo un análisis del efecto de los distintos regímenes de  
448 estabilidad atmosférica en la producción de los parques eólicos afectando la interacción de  
449 las estelas de los aerogeneradores. Este estudio resulta novedoso al haberse realizado  
450 sobre las mediciones de mástil meteorológico y potencia de los aerogeneradores en un  
451 parque eólico *onshore* emplazado en la Patagonia, una de las regiones con mejor recurso  
452 eólico del mundo. Asimismo, se destaca la extensión del registro observacional, que es  
453 atípico para este tipo de análisis.

454 Al análisis del efecto de las estelas se le dio un nuevo enfoque al estudiar su dependencia  
455 con la estabilidad de la CLA. Para los casos de interferencia entre aerogeneradores  
456 cercanos, la condición de atmósfera inestable, típica durante el medio día en situaciones

457 con marcado ciclo diurno, inducen una mayor mezcla disipando más rápidamente la estela  
458 y atenuando significativamente su impacto en la producción. Particularmente para los  
459 casos de medio día en verano, el efecto de estela se reduce casi en su totalidad.  
460 Contrariamente, para atmósferas estables, que ocurren generalmente durante la noche, la  
461 mezcla de la estela disminuye y permite que se mantenga intensa por mayores distancias,  
462 aumentando su impacto. Durante el invierno, la variabilidad en el fenómeno de estela a lo  
463 largo del ciclo diurno se ve suavizada.

464 A pesar de esta dependencia de la estela, y por lo tanto de la eficiencia total del parque,  
465 con los regímenes de estabilidad de la CLA, es una práctica normal en la industria analizar  
466 la producción de los parques *a priori* considerando un comportamiento promedio diario y  
467 anual cercano a la neutralidad. Esta práctica se justifica en el mayor esfuerzo  
468 computacional que requiere el uso de herramientas donde se consideren los diferentes  
469 regímenes de estabilidad, junto con el mayor conocimiento de las condiciones locales del  
470 recurso. En el caso de PER, el estudio de las mediciones en el mástil en la ubicación del  
471 parque eólico muestra que en más del 50 % del tiempo la capa de atmósfera cercana a los  
472 aerogeneradores es neutral, caracterizada por una turbulencia de origen principalmente  
473 mecánico debida a la interacción con la rugosidad del suelo. En este caso, además, la  
474 frecuencia con que se observan condiciones estables es ligeramente mayor a la de las  
475 inestables, y si bien los efectos de ambas situaciones no se contrarrestan, el resultado final  
476 observado se asemeja notablemente al neutral. Este comportamiento podría no  
477 generalizarse a otras ubicaciones geográficas, pero parece representar adecuadamente las  
478 ubicaciones cercanas al PER en una de las regiones con mejor recurso eólico de la  
479 Patagonia Argentina.

480

481 **AGRADECIMIENTOS:** Los autores desean agradecer a la Agencia Nacional de  
482 Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación [PICT2013-  
483 1338], al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas [PIP  
484 11220120100480CO y becas doctorales GPND y MLM], a la empresa GENNEIA S.A.  
485 por facilitar la información del Parque Eólico Rawson y al tiempo de cómputo en el

486 Clúster TUPAC brindado por el CSC-CONICET.

487

488 **REFERENCIAS**

489 Bodine, D., Klein, P. M., Arms, S. C., y Shapiro, A. (2009). Variability of surface air  
490 temperature over gently sloped terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,  
491 48(6):1117–1141.

492 Cañadillas, B., Muñoz-Esparza, D., y Neumann, T. (2011). Fluxes estimation and the  
493 derivation of the atmospheric stability at the offshore mast FINO1. En *Scientific*  
494 *Proceedings of the 2011 European Wind Energy Association Offshore Conference and*  
495 *Exhibition, EWEA Offshore'11. EWEA - European Wind Energy Association.*

496 Cúneo, L. M., Cerne, S. B., y Llano, M. P. (2018). Descripción preliminar de la velocidad  
497 y dirección del viento medio mensual en Trelew. *Meteorológica*, 44(1):66–80.

498 Dörenkämper, M., Witha, B., Steinfeld, G., Heinemann, D., y Kühn, M. (2015). The  
499 impact of stable atmospheric boundary layers on wind-turbine wakes within offshore wind  
500 farms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144:146–153.

501 Doubrawa, P., Debnath, M., Moriarty, P. J., Branlard, E., Herges, T., Maniaci, D., y  
502 Naughton, B. (2019). Benchmarks for model validation based on lidar wake  
503 measurements. En *Journal of Physics: Conference Series*, volumen 1256, pp 012024. IOP  
504 Publishing.

505 Han, X., Liu, D., Xu, C., y Shen, W. Z. (2018). Atmospheric stability and topography  
506 effects on wind turbine performance and wake properties in complex terrain. *Renewable*  
507 *energy*, 126:640–651.

508 Mauritsen, T. y Svensson, G. (2007). Observations of stably stratified shear-driven  
509 atmospheric turbulence at low and high richardson numbers. *Journal of the atmospheric*  
510 *sciences*, 64(2):645–655.

511 Navarro Diaz, G. P., Saulo, A. C., y Otero, A. D. (2019). Wind farm interference and  
512 terrain interaction simulation by means of an adaptive actuator disc. *Journal of Wind*  
513 *Engineering and Industrial Aerodynamics*, 186:58–67.

514 Newman, J. y Klein, P. (2014). The impacts of atmospheric stability on the accuracy of

515 wind speed extrapolation methods. Resources, 3(1):81–105.

516 Schepers, J., Obdam, T., y Prospathopoulos, J. (2012). Analysis of wake measurements  
517 from the ecn wind turbine test site wieringermeer, ewtw. Wind Energy, 15(4):575–591.

518 Sedefian, L. y Bennett, E. (1980). A comparison of turbulence classification schemes.  
519 Atmospheric Environment (1967), 14(7):741–750.

520 Seguro, J. y Lambert, T. (2000). Modern estimation of the parameters of the weibull wind  
521 speed distribution for wind energy analysis. Journal of wind engineering and industrial  
522 aerodynamics, 85(1):75–84.

523 Stull, R. B. (2000). Meteorology for scientists and engineers. Brooks/Cole.

524 Waimann, C. (2016). Desarrollo de un sistema de pronóstico estocástico-dinámico de  
525 producción de energía eólica basado en el modelo WRF/CIMA. Tesis doctoral, Facultad  
526 de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

527 Wharton, S. y Lundquist, J. K. (2012). Assessing atmospheric stability and its impacts on  
528 rotor-disk wind characteristics at an onshore wind farm. Wind Energy, 15(4):525–546.

529

530

531

532

533

534

535

536

537

538

539

540

541

542

543

544 **Figuras y Tablas**

545

Clasificación de estabilidades	$Ri$
Muy inestable	$Ri < -0,2$
Inestable	$-0,2 \leq Ri < -0,1$
Neutral	$-0,1 \leq Ri < 0,1$
Estable	$0,1 \leq Ri < 0,25$
Muy estable	$0,25 \leq Ri$

547 Tabla I: Límites de la clasificación de estabilidades en la CLA en función de  $Ri$  (Newman  
548 y Klein, 2014).

549

550

Clasificación de estabilidades	Diurno	Nocturno	Total
Muy inestable	8,2 %	0,0 %	2,4 %
Inestable	43,6 %	0,0 %	14,7 %
Neutral	47,9 %	29,4 %	44,6 %
Estable	0,2 %	35,4 %	20,3 %
Muy estable	0,1 %	35,2 %	18,0 %

552 Tabla II: Proporciones de los distintos regímenes de estabilidad atmosférica para  
553 velocidades entre 5 y 9 m/s durante los períodos diurno, nocturno y el total.

554

555

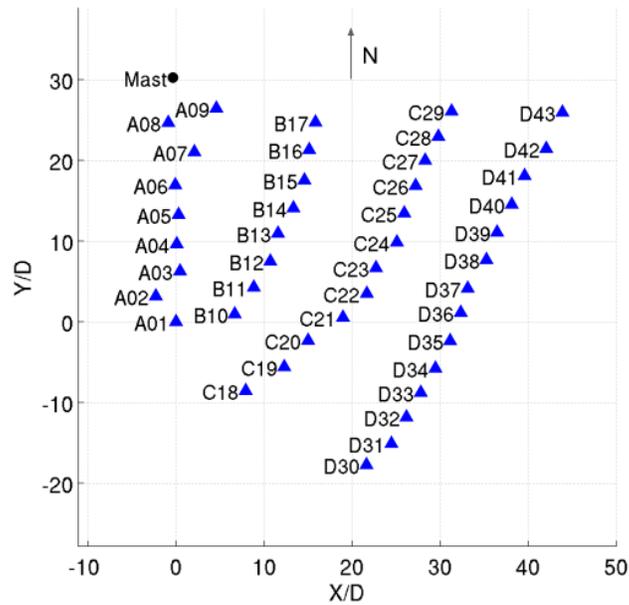
556

557

558

559

560



561 Figura 1: Disposición de los aerogeneradores, con su identificación por fila A, B, C y D,  
 562 y del mástil meteorológico. Las dimensiones horizontales están adimensionalizadas con  
 563 el diámetro del aerogenerador ( $D = 90$  m).  
 564

565  
 566  
 567  
 568  
 569  
 570  
 571  
 572  
 573  
 574  
 575  
 576  
 577  
 578  
 579  
 580  
 581  
 582  
 583  
 584  
 585  
 586  
 587

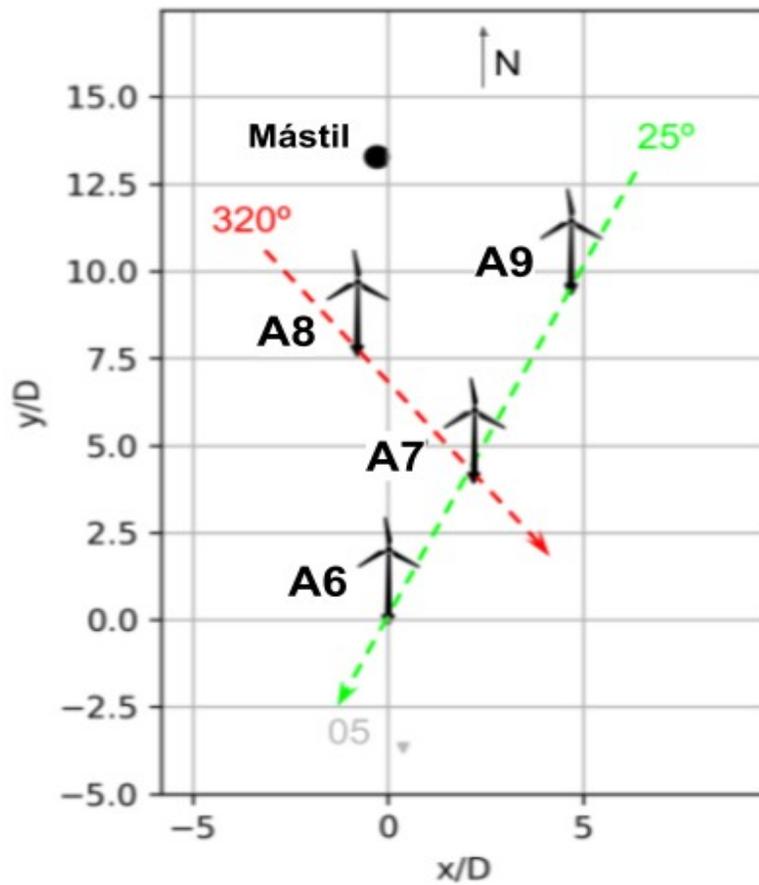
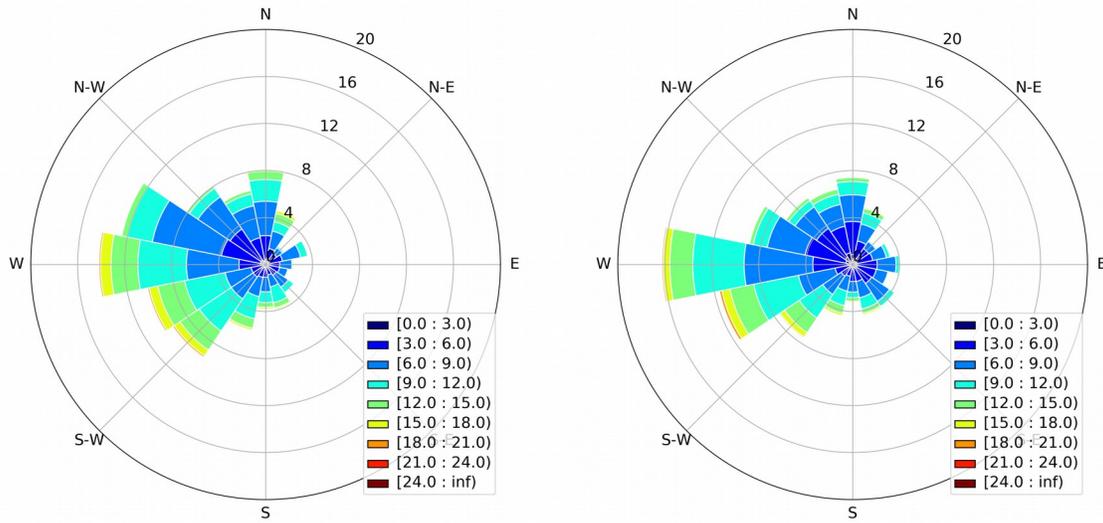


Figura 2: Ubicación de los 4 aerogeneradores más cercanos al mástil meteorológico del PER.

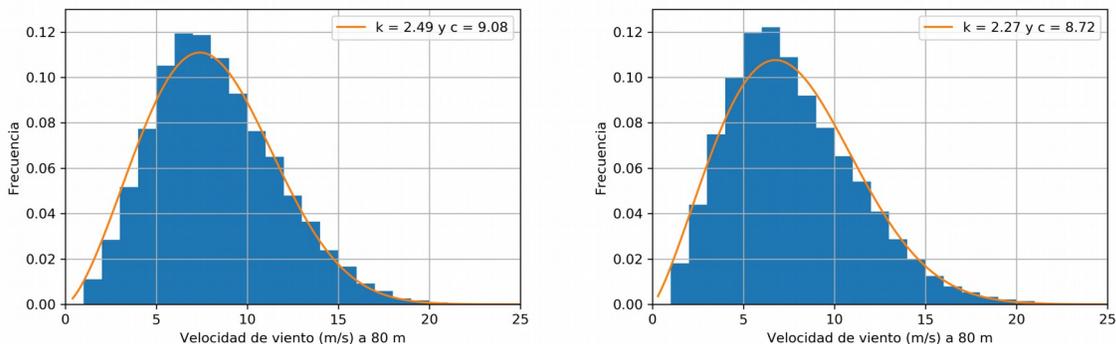
588  
589  
590  
591  
592  
593  
594  
595  
596  
597  
598  
599  
600  
601  
602  
603  
604  
605  
606  
607  
608  
609  
610  
611  
612  
613  
614  
615  
616  
617  
618  
619  
620  
621  
622  
623  
624  
625  
626  
627  
628  
629  
630  
631  
632



634  
 635 Figura 3: Rosas de vientos discretizadas en 16 sectores, correspondientes a la ubicación  
 636 del PER durante dos períodos de medición: (izquierda) durante el estudio previo y (dere-  
 637 cha) en la etapa productiva. Se utilizaron las mediciones de los mastiles con instrumentos  
 638 a 80 m de altura. Velocidades en [m/s].

639  
 640  
 641  
 642  
 643  
 644  
 645  
 646  
 647  
 648  
 649  
 650  
 651  
 652  
 653  
 654  
 655  
 656  
 657  
 658  
 659  
 660  
 661

662



664 Figura 4: Distribución de datos diez-minutales de velocidad de viento, correspondientes  
665 a la ubicación del PER durante dos períodos de medición: (izquierda) durante el estudio  
666 previo y (derecha) en la etapa productiva. Se utilizaron las mediciones de los mástiles con  
667 instrumentos a 80 m de altura. También se grafican las correspondientes distribuciones  
668 Weibull ajustadas a los datos y se reportan sus coeficientes. Velocidades en [m/s].

669  
670  
671  
672  
673  
674  
675  
676  
677  
678  
679  
680  
681  
682  
683  
684  
685  
686  
687  
688  
689  
690  
691  
692  
693  
694  
695

696  
697  
698  
699  
700  
701  
702  
703  
704  
705  
706  
707  
708  
709  
710  
711  
712  
713  
714  
715  
716  
717  
718  
719  
720  
721  
722  
723  
724  
725  
726  
727  
728  
729  
730  
731  
732  
733  
734  
735  
736  
737  
738  
739  
740

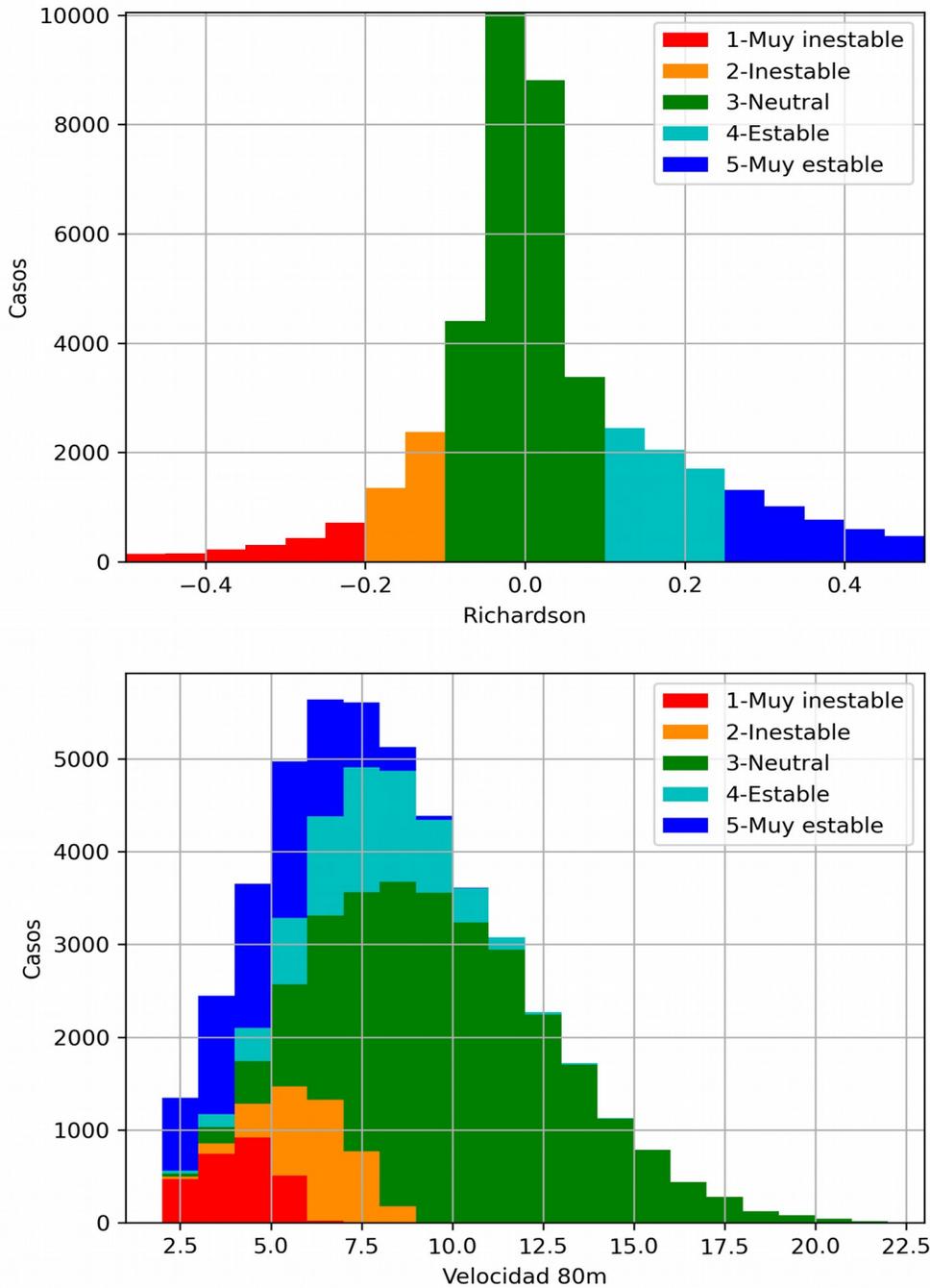


Figura 5: Distribución de casos en función de valor de Ri (arriba) y de la velocidad del viento a la altura de la góndola 80m (abajo). Se indican los 5 regímenes de estabilidad mediante la clasificación de acuerdo al Ri.

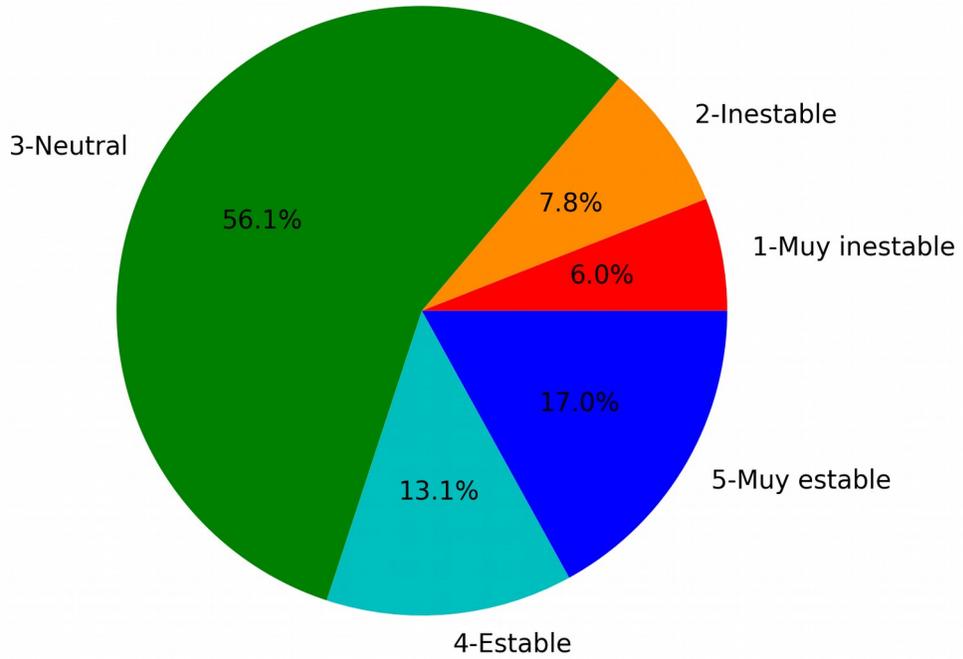
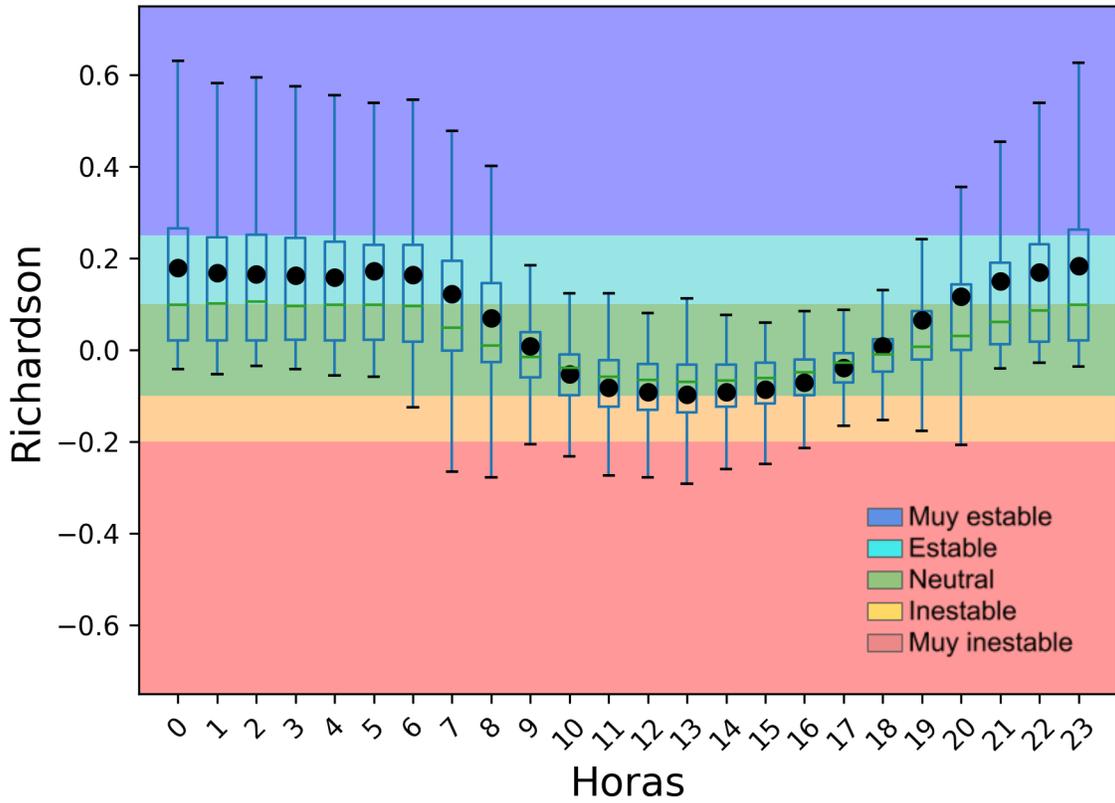


Figura 6: Proporción de ocurrencia de los 5 regímenes de estabilidad.

742  
743  
744  
745  
746  
747  
748  
749  
750  
751  
752  
753  
754  
755  
756  
757  
758  
759  
760  
761

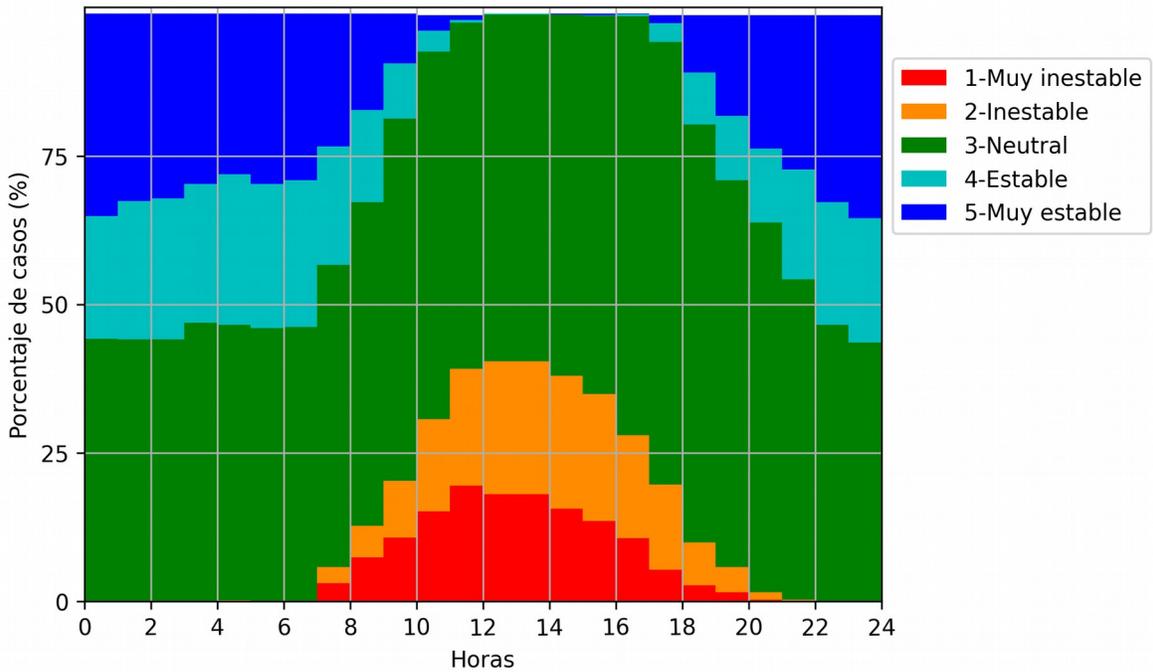
762  
763  
764



766      Figura 7: Variación del valor promedio anual de Ri para cada hora del ciclo diurno  
767 (marcadores negros). También se grafica el boxplot con el rango intercuartil (del primero  
768 al tercer cuartil). Se grafican los valores extremos del primer y cuarto cuartil, descartando  
769 como valores atípicos (outliers) aquellos que se alejan de los límites del boxplot más de  
770 1,5 veces el rango intercuartil.

771  
772  
773  
774  
775  
776  
777  
778  
779  
780  
781  
782  
783

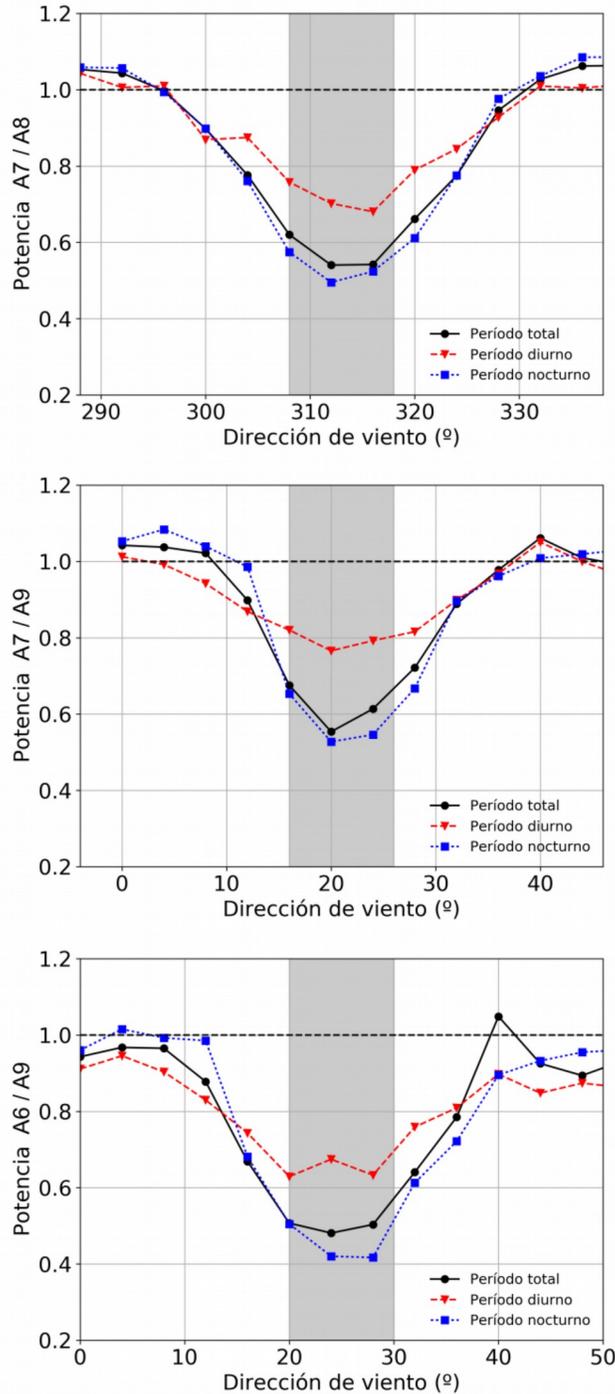
784  
785  
786  
787  
788



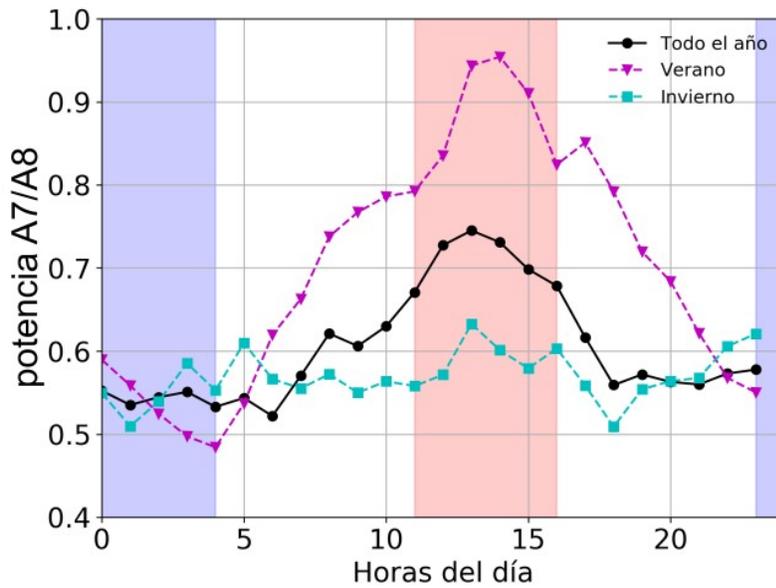
790 Figura 8: Porcentaje de los 5 regímenes de estabilidad para cada hora del ciclo diurno.  
791 Los datos fueron seleccionados para el rango de velocidades del funcionamiento del ae-  
792 rogenerador (4 a 25 m/s).

793  
794  
795  
796  
797  
798  
799  
800  
801  
802  
803  
804  
805  
806  
807  
808  
809

810  
811  
812  
813  
814  
815  
816  
817  
818  
819  
820  
821  
822  
823  
824  
825  
826  
827  
828  
829  
830  
831  
832  
833  
834  
835  
836  
837  
838  
839  
840  
841  
842  
843  
844  
845  
846  
847  
848  
849

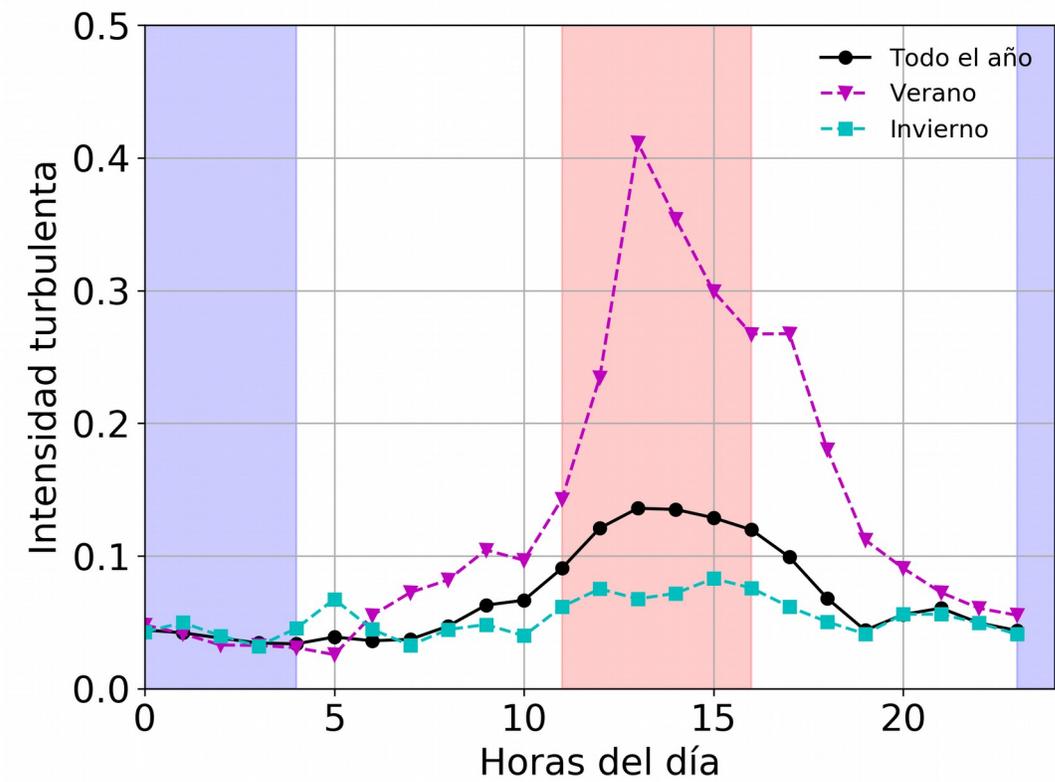


850 Figura 9: Impacto de las estelas en la potencia medida en términos de la dirección de  
851 viento para velocidades de entrada entre 5 y 9 m/s para el período completo y su separa-  
852 ción entre los rangos diurno y nocturno: (arriba) Aerogenerador A7 con respecto a A8  
853 (dirección de referencia de 313°), (medio) aerogenerador A7 (21°) y (abajo) aerogenera-  
854 dor A6 (25°) con respecto al A9.



856 Figura 10: Relación de potencias mínima del aerogenerador A7 comparado con A8 a lo  
 857 largo del día, separando el conjunto de datos entre los meses de invierno (JJA) y verano  
 858 (DEF). Las zonas coloreadas en azul y rojo corresponden a las franjas horarias tomadas  
 859 para el período nocturno y diurno, respectivamente.

860  
861  
862  
863  
864  
865  
866  
867  
868  
869  
870  
871  
872  
873  
874  
875  
876  
877  
878  
879  
880  
881



883  
884 Figura 11: Variación de la intensidad turbulenta longitudinal, medida con el anemómetro  
885 de coperolas del mástil a 80 m, a lo largo del día para la dirección de máxima interferencia  
886 del aerogenerador A7 comparado con A8. El conjunto de datos se separó entre los meses  
887 de invierno (JJA) y verano (DEF).  
888  
889