

Primeros resultados de la variación del gradiente de potencial en una estación tropical en América del Sur (Ica, Perú)

Rubén Romero^{1,4}, José Tacza^{2,3,4}, Joseph Arroyo¹, Francis Prieto¹, Edith Macotela⁵, Yovanny Buleje¹, René Loayza¹, Ulices Fernandez⁶, Jean-Pierre Raulin⁴

¹ Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Ica, Peru.

² Instituto de Geofísica, Academia Polaca de Ciencias, Varsovia, Polonia.

³ Instituto HUN-REN de Física de la Tierra y Ciencias Espaciales, Sopron, Hungría.

⁴ Centro de Radio Astronomía y Astrofísica Mackenzie, Escuela de Ingeniería, Universidad Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil.

⁵ Universidad de Bath, Bath, Reino Unido.

⁶ Universidad Científica del Sur, Lima, Peru.

Abstract

Las mediciones del gradiente de potencial (PG) bajo condiciones de buen tiempo en nuevas ubicaciones son fundamentales para el monitoreo del circuito eléctrico global. En este estudio, analizamos las variaciones del PG registradas en la ciudad de Ica, Perú, durante el período comprendido entre marzo de 2018 y diciembre de 2022. Nuestro análisis incluyó una comparación detallada del PG con diversos parámetros meteorológicos como precipitación, velocidad y dirección del viento, tormentas de polvo, remolinos de polvo (dust devils) y niebla, con el fin de establecer la curva característica del PG bajo condiciones de buen tiempo (denominada curva estándar). Identificamos un umbral significativo de 3.5 m/s para vientos fuertes, lo cual ayuda a prevenir la influencia de la brisa marina y el levantamiento de polvo sobre el PG. Nuestros resultados mostraron el impacto de las tormentas de polvo “Paracas” sobre el PG, en concordancia con patrones observados en otras regiones áridas del mundo. Posteriormente, calculamos promedios mensuales, estacionales y anuales de la curva estándar, los cuales evidenciaron una respuesta probablemente asociada a procesos convectivos locales en la variación diurna del PG. Asimismo, la variación estacional del PG revela valores más altos durante los meses de junio, julio y agosto en comparación con diciembre, enero y febrero. Estas diferencias se atribuyen a cambios estacionales en las concentraciones de aerosoles, posiblemente influenciados por actividades de quema de biomasa en el Perú. Adicionalmente, realizamos un análisis mediante transformada wavelet de los valores horarios del PG. Se identificaron periodicidades de 1 día, aproximadamente 188 días y 360 días, relacionadas con los periodos diurno, semianual y anual, respectivamente. Durante los meses entre enero y marzo de 2018 se encontró un periodo intenso de aproximadamente 45 días, probablemente asociado a uno de los eventos más fuertes de la Oscilación Madden-Julian. A través de esta investigación integral, profundizamos la comprensión de las complejas relaciones entre las condiciones meteorológicas, la brisa marina, las tormentas de polvo y el PG en regiones áridas como Ica.

1. Introducción

Nuestro planeta puede conceptualizarse como un gran capacitor esférico, donde la superficie de la Tierra actúa como un buen conductor de electricidad y la atmósfera superior funciona como la segunda capa. El aire entre estas dos capas es un aislante eléctrico relativamente bueno (es decir, un medio dieléctrico con fugas), formando lo que se conoce como el modelo del Circuito Eléctrico Global (GEC, por sus siglas en inglés). El modelo GEC describe el flujo de corrientes eléctricas a escala global alrededor de la Tierra, donde principalmente las tormentas eléctricas y las nubes convectivas electrificadas cargan la

atmósfera superior, y las corrientes eléctricas retornan a la superficie terrestre durante condiciones de buen tiempo (Rycroft et al., 2008; Liu et al., 2010; Haldoupis et al., 2017).

Entre 1928 y 1929, la Carnegie Institution of Washington realizó numerosas mediciones del campo eléctrico atmosférico sobre los océanos a nivel mundial. Análisis posteriores revelaron que la variación diaria del campo eléctrico, medida en Tiempo Universal (UT), era consistente independientemente de la ubicación del barco (Torreson et al., 1946). Además, bajo condiciones de buen tiempo, esta variación diaria presentaba una intensidad de $E = -130 \text{ V/m}$, donde el signo negativo indica que el vector del campo eléctrico apunta hacia abajo. Esta variación diaria se conoce comúnmente como la curva universal de Carnegie (Harrison, 2013).

En meteorología, el término gradiente de potencial (PG) se utiliza para referirse al mismo concepto que el campo eléctrico atmosférico (E). Tanto PG como E representan la misma magnitud, pero convencionalmente el PG se considera positivo en condiciones de buen tiempo. En este manuscrito se adoptará la convención de PG.

Las mediciones de PG a nivel mundial son importantes para monitorear el GEC. Sin embargo, estas mediciones suelen estar influenciadas por efectos locales como la contaminación y diversos parámetros meteorológicos (Nicoll et al., 2019). Por ello, es fundamental identificar con precisión las perturbaciones del PG asociadas a efectos locales. Entre los parámetros meteorológicos que afectan significativamente al PG se encuentran la precipitación, la velocidad y dirección del viento, las tormentas de polvo y la niebla.

Bennett y Harrison (2007) observaron que las nubes cumuliformes, que contienen regiones cargadas, pueden provocar desviaciones significativas en el PG superficial. Las nubes más profundas suelen portar mayores cargas, generando desviaciones más grandes durante su tránsito. La precipitación, que frecuentemente transporta carga eléctrica, también contribuye a estas fluctuaciones; sin embargo, las desviaciones asociadas a la lluvia suelen ser de corta duración y menor magnitud en comparación con las inducidas por el paso de nubes cargadas. Telang (1930) respalda esta observación, indicando que las etapas iniciales de la lluvia pueden revertir abruptamente el PG normalmente positivo, efecto que desaparece rápidamente tras el cese de la precipitación. Además, mientras que la lluvia ligera se ha asociado con disminuciones del PG en superficie, la precipitación convectiva intensa con bases nubosas fuertemente cargadas produce variaciones mucho más pronunciadas. Karagioras y Kourtidis (2021) analizaron eventos prolongados de lluvia y encontraron que las precipitaciones extendidas pueden ejercer una influencia más sostenida sobre el PG, en contraste con los efectos breves de lluvias ligeras. Los cambios en la dirección del viento pueden afectar significativamente el PG al modificar la concentración de aerosoles y partículas cargadas en el aire. Por ejemplo, si existen fuentes cercanas de separación de carga, como polvo o emisiones industriales, un cambio en la dirección del viento puede transportar estas partículas cargadas hacia el sitio de observación, generando fluctuaciones de corto plazo en el PG (Bennett y Harrison, 2007). Asimismo, vientos fuertes pueden inducir separación de carga mediante interacciones con la superficie terrestre o cuerpos de agua, alterando el PG en superficie. Nicoll et al. (2022) estudiaron el impacto del viento en regiones desérticas, específicamente la influencia de la brisa marina en los Emiratos Árabes Unidos. Concluyeron que la circulación de la brisa marina, junto con procesos convectivos locales, gobierna predominantemente la variación diaria del PG. También establecieron nuevos criterios de buen tiempo para zonas áridas a fin de mitigar la influencia de la brisa marina: velocidad del viento entre 1 y 5 m/s y visibilidad mayor a 25 km.

De manera similar, los efectos del polvo y las tormentas de polvo están ampliamente documentados. Los campos eléctricos generados durante estos eventos presentan una relación directa con la concentración de polvo y desempeñan un papel crucial en la carga volumétrica dominante observada en estas situaciones. Se ha observado que el campo eléctrico puede intensificarse horas antes de la llegada de tormentas de polvo, constituyendo una herramienta valiosa para la detección temprana y precisa de

103 estos eventos, superando observaciones terrestres y satelitales convencionales (Zhang et al., 2017;
104 Williams et al., 2008). Además, la carga eléctrica transportada por partículas de polvo y arena puede
105 incrementar el riesgo de incendios y daños a equipos eléctricos, lo cual tiene implicaciones importantes
106 en medidas de seguridad e infraestructura en zonas afectadas.

107
108 Los remolinos de polvo (dust devils), pequeños torbellinos de corta duración que ocurren con mayor
109 frecuencia a primeras horas de la tarde cuando la superficie terrestre se calienta rápidamente, son
110 comunes en terrenos desérticos y áridos caracterizados por extensas áreas de suelo seco sin vegetación
111 (Bagnold, 2012). Franzese et al. (2018) encontraron una relación lineal entre el campo eléctrico y la
112 concentración de partículas levantadas en dust devils, en concordancia con Esposito et al. (2016),
113 quienes indicaron que el proceso de electrificación depende no solo del tamaño del grano sino también
114 de la composición de las partículas. Duff y Lacks (2008) demostraron que la electrificación triboeléctrica
115 puede ocurrir en sistemas granulares compuestos por partículas de igual composición, observando que
116 las partículas más pequeñas tienden a cargarse negativamente mientras que las más grandes adquieren
117 carga positiva. También hallaron que la magnitud de la carga triboeléctrica aumenta cuando existe una
118 amplia distribución de tamaños de partículas.

119
120 Los fenómenos de niebla y neblina, caracterizados por la presencia de gotas de agua suspendidas en el
121 aire que reducen la visibilidad, también influyen en el PG. Según el Glossary of Meteorology (American
122 Meteorological Society, 2023), la diferencia principal entre ambos radica en el grado de reducción de
123 visibilidad: la niebla corresponde a visibilidad menor a 1 km, mientras que la neblina reduce la
124 visibilidad entre 1 y 5 km. Investigaciones actuales muestran que la niebla tiende a amplificar el PG
125 debido a que las gotas más grandes dificultan la movilidad de los portadores de carga. Conforme a la ley
126 de Ohm, esta disminución de la conductividad conduce a un aumento del PG (Anisimov et al., 2005;
127 Bennett y Harrison, 2009; Yair y Yaniv, 2023). Asimismo, se ha observado que el PG puede responder
128 a los núcleos de niebla antes de que esta sea visible, lo cual tiene implicaciones prácticas para la
129 predicción de niebla a corto plazo (Bennett y Harrison, 2007).

130
131 Como se mencionó anteriormente, los parámetros meteorológicos influyen en el PG. Por lo tanto, es
132 esencial analizar cuidadosamente el PG antes de estudiar influencias globales. Actualmente existen
133 numerosas estaciones de PG en el mundo dedicadas al estudio del GEC. Por ejemplo, la red GloCAEM
134 (Global Coordination of Atmospheric Electricity Measurements) cuenta con 23 estaciones de PG. El
135 análisis de los datos obtenidos en estas estaciones permite comprender con mayor detalle la variabilidad
136 diaria del GEC y los factores que lo modulan, incluyendo variaciones climáticas y efectos del space
137 weather (Nicoll et al., 2019). No obstante, aún es necesaria la instalación y el análisis detallado de nuevas
138 estaciones para avanzar en la investigación del GEC.

139
140 En este estudio presentamos cinco años de datos de PG registrados en Ica, Perú (coordenadas
141 geográficas: latitud 14.089°S, longitud 75.736°O, altitud 406 m s.n.m.) desde marzo de 2018 hasta
142 diciembre de 2022. Como primer paso, realizamos un análisis integral de diversos parámetros
143 meteorológicos y su relación con el PG. Posteriormente, se definieron las condiciones de buen tiempo
144 para la estación de Ica. En segundo lugar, se obtuvo la curva diurna típica del PG bajo condiciones de
145 buen tiempo (denominada curva estándar). En tercer lugar, se empleó una técnica espectral
146 (transformada wavelet) para determinar las periodicidades dominantes. En la Sección 2 se describen el
147 sitio de medición, la instrumentación y el análisis de datos utilizados. Los resultados se presentan y
148 discuten en las Secciones 3.1 y 3.2 (análisis temporal) y en la Sección 3.3 (análisis espectral).
149 Finalmente, los principales hallazgos se resumen en la última sección.

150 151 **2. Descripción del sitio, instrumentación y análisis de datos**

152 153 **2.1 Descripción del sitio**

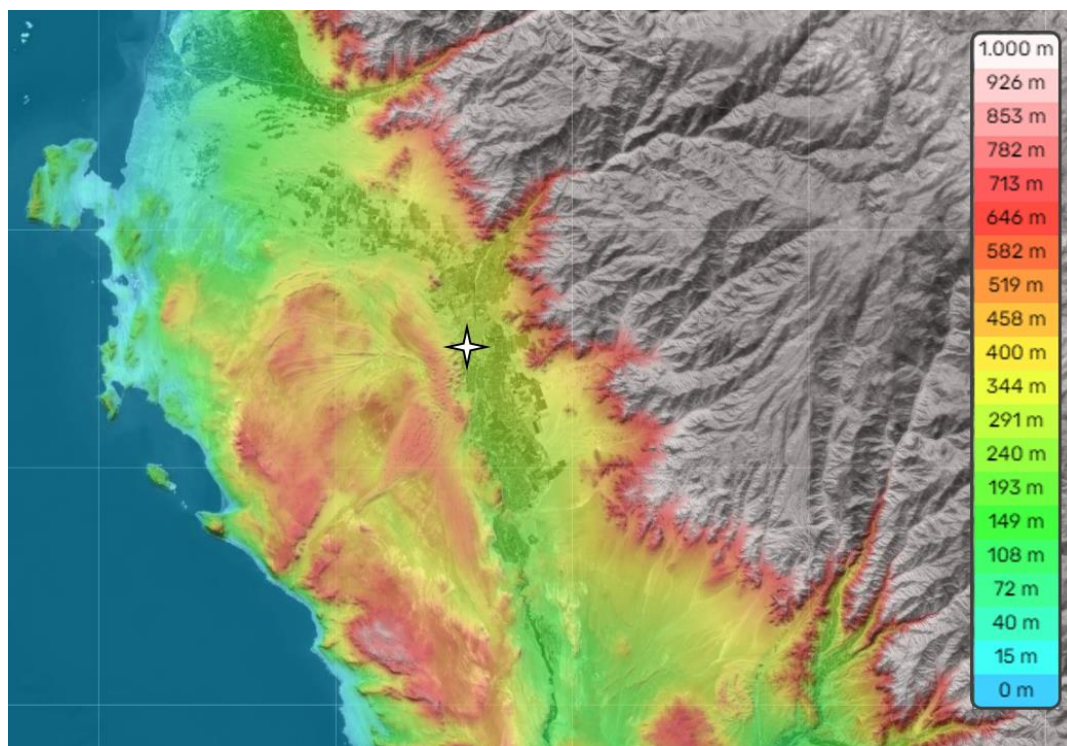
155 Ica se ubica en la costa centro-sur del Perú, a una altitud de 406 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.).
156 Es una región desértica accidentada, rodeada por cadenas montañosas, valles, colinas y dunas, con oasis
157 y extensas pampas en sus alrededores. La ciudad se encuentra sobre una llanura aluvial formada por el
158 cauce del río Ica y presenta una cantidad significativa de depósitos eólicos, compuestos por arena seca
159 y suelta que migra debido a la acción del viento, originando dunas y bancos de arena.

160
161 El clima es cálido y árido, con una temperatura media anual de aproximadamente 21 °C y precipitaciones
162 anuales mínimas (Haney y Grolier, 1991; Gay, 2005; Dávila et al., 2021). Ica presenta un clima
163 subtropical árido, con lluvias ocasionales y de baja intensidad que ocurren principalmente entre enero y
164 marzo. La intensidad de las precipitaciones puede verse influenciada por fenómenos climáticos como El
165 Niño, el cual puede generar lluvias intensas a lo largo de la costa peruana (Dávila et al., 2021).

166
167 Ubicada a 60 km de la costa, la ciudad de Ica se ve ocasionalmente afectada por tormentas de polvo
168 conocidas como vientos “Paracas”. Estos vientos se originan en la costa Paracas-Pisco, principalmente
169 entre julio y septiembre, en el intervalo horario de 12:00 a 17:00 (hora local), alcanzando velocidades
170 superficiales de aproximadamente 17 m/s. Los mecanismos que desencadenan los vientos Paracas aún
171 no están completamente identificados; sin embargo, investigaciones recientes indican que la topografía
172 local y la radiación de onda corta que alcanza la superficie contribuyen a intensificar el viento y la
173 turbulencia necesarios para la ocurrencia de este fenómeno (Quijano, 2013).

174
175 La Figura 1 presenta un mapa en colores que ilustra la topografía de la ciudad de Ica, destacando las
176 variaciones de altitud. El mapa emplea tonalidades grises para representar zonas de mayor elevación,
177 mientras que los colores indican áreas de menor altitud. Se observa claramente que la ciudad se encuentra
178 en un valle rodeado por terrenos elevados, lo que genera un patrón de viento característico. Según Gay
179 (2005), los vientos que transportan arena convergen desde distintas direcciones, específicamente desde
180 el noroeste, oeste, suroeste y sureste. El autor concluye que la arena proviene de las playas del océano
181 Pacífico, es transportada tierra adentro por vientos predominantes del sur-sureste y finalmente se
182 deposita en grandes acumulaciones, generalmente localizadas en zonas de mayor altitud.

183



184
185 **Figura 1.** Topografía de la ciudad de Ica. La estrella indica la ubicación del sensor. Datos obtenidos de
186 www.topographic-map.com
187

2.2 Instrumentación

La estación de Ica forma parte de una red de 9 estaciones con sensores de campo eléctrico (field mill) distribuidas en distintos puntos de América del Sur (Tacza et al., 2020). Para las mediciones del gradiente de potencial (PG) se utiliza el sensor BOLTEK EFM-100, cuyo funcionamiento se basa en el principio de inducción electrostática: cuando una placa conductora se expone a un campo eléctrico, se induce en ella una carga proporcional a la intensidad del campo eléctrico y al área de la placa (Imyanitov, 1957; Secker, 1975; MacGorman y Rust, 1998). El EFM posee un rango dinámico de ± 20 kV/m y las mediciones se registran con una resolución temporal de 0.05 s. Aunque el sensor fue instalado inicialmente en diciembre de 2011, registró mediciones cuasi-constantes hasta diciembre de 2014. Posteriormente, se obtuvieron registros esporádicos hasta 2017. Tacza et al. (2020) describieron las mediciones de PG correspondientes al período 2011–2014. Desde febrero de 2018, el sensor registra datos de manera continua. El instrumento se encuentra instalado en las instalaciones del Centro de Investigación sobre la Actividad Solar y sus Efectos sobre la Tierra (CIEASEST), dentro de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica (14.089°S, 75.736°O; altitud: 406 m s.n.m.). Adicionalmente, en CIEASEST se dispone de una estación meteorológica automática Campbell, ubicada a 50 metros del sensor de campo eléctrico. Esta estación está equipada con piranómetro, anemómetro, termómetro, higrómetro y barómetro. Registra datos con una resolución temporal de 10 segundos y fue instalada en julio de 2019.

2.3 Análisis de datos

El sensor de campo eléctrico está instalado a una altura de 0.5 m sobre el suelo, lo que produce una sobreestimación de los valores de PG. Para corregir este efecto, los valores fueron ajustados utilizando un factor de reducción (Tacza et al., 2020). La Figura 2a presenta la serie temporal de los valores horarios del PG en la estación de Ica, mientras que la Figura 2b muestra la distribución (histograma) de dichos valores horarios. La media y la mediana del PG son 68 V/m y 50 V/m, respectivamente.

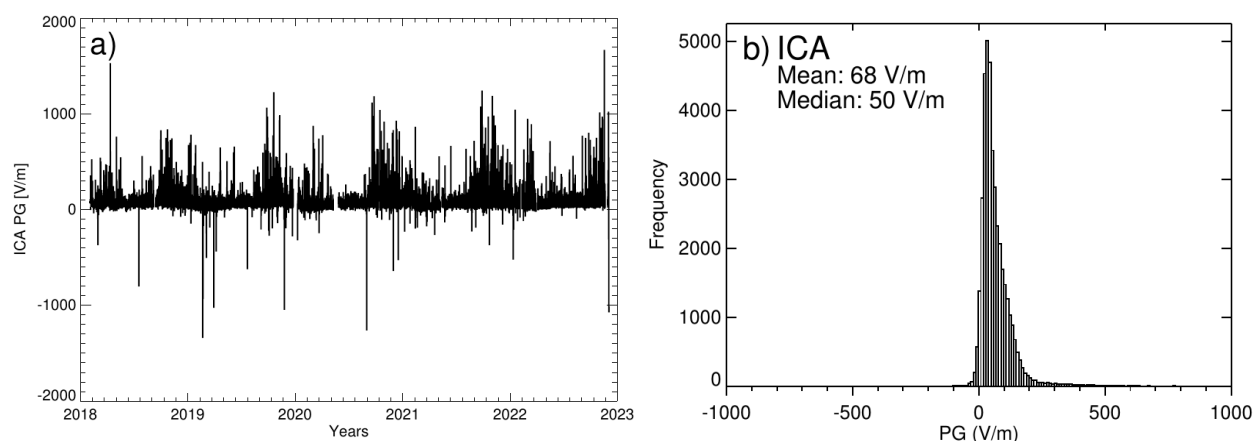


Figura 2. (a) Serie temporal y (b) histograma de los valores medios horarios del PG en la estación de Ica.

Para obtener una variación diaria del PG que represente un patrón global, es necesario considerar condiciones de “buen tiempo”. La Oficina Meteorológica del Reino Unido define desde 1964 el buen tiempo como aquellas condiciones que cumplen criterios específicos: cielo despejado en al menos 3/8 de su cobertura, ausencia de precipitación y ausencia de vientos extremos (Harrison, 2013). La Figura 3a presenta una comparación de los valores de PG durante días de buen tiempo, mientras que la Figura 3b muestra los valores correspondientes a días con condiciones atmosféricas perturbadas. Sin embargo, estudios previos han destacado la importancia de definir las condiciones de buen tiempo en función de las características específicas de cada sitio (Tacza et al., 2020, 2021; Nicoll et al., 2022). En la Sección 3.1 se realizó un análisis detallado de la variación del PG bajo diferentes condiciones meteorológicas, identificando los criterios óptimos específicos para la estación de Ica. Posteriormente, en la Sección 3.2,

se calcularon las variaciones mensuales, estacionales y anuales del PG considerando exclusivamente condiciones de buen tiempo.

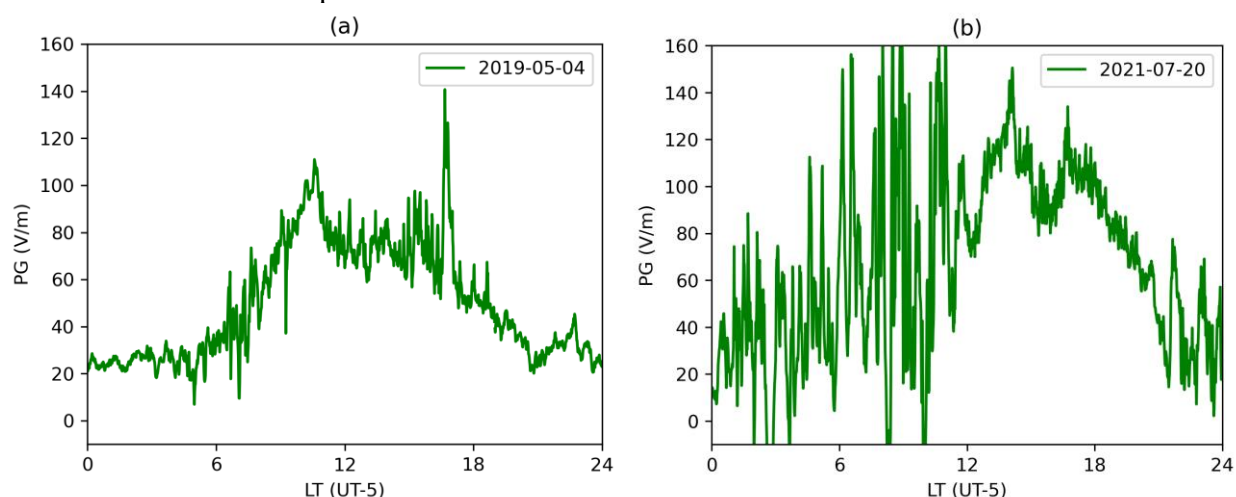


Figura 3. (a) PG bajo condiciones de buen tiempo. (b) PG bajo condiciones atmosféricas perturbadas.

En la Sección 3.3 se empleó la transformada wavelet para investigar la presencia de oscilaciones regulares de corto plazo en los valores de PG. El análisis wavelet es una técnica utilizada para extraer tanto los modos dominantes como sus variaciones temporales a partir de una serie temporal (Torrence y Compo, 1998). En este estudio se utilizó el paquete de transformada wavelet continua para MATLAB (Grinsted et al., 2004), incorporando la corrección de sesgo propuesta por Liu et al. (2007).

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis del PG en relación con parámetros meteorológicos

Como se mencionó anteriormente, los parámetros meteorológicos locales —incluyendo precipitación, niebla y vientos fuertes— tienen un impacto significativo sobre el PG. En la estación de Ica, se espera que el PG esté fuertemente influenciado por la concentración de aerosoles, la cual depende a su vez de la velocidad y dirección del viento.

El viento desempeña un papel fundamental en la suspensión de partículas de polvo desde la superficie, lo que puede dar lugar a la formación de tormentas de polvo o remolinos de polvo (dust devils). Aunque en Ica los eventos de precipitación y niebla son poco frecuentes, también merecen ser analizados. Todos estos fenómenos pueden modificar la conductividad eléctrica atmosférica y, en consecuencia, afectar el PG registrado en el sitio. Por estas razones, en este trabajo se estudió el efecto de la precipitación, la velocidad y dirección del viento, los dust devils y la niebla sobre los valores de PG registrados en la estación de Ica.

3.1.1. Precipitación

La Figura 4 muestra la variación del PG durante un día lluvioso (curva verde) en comparación con la variación media mensual del PG bajo condiciones de buen tiempo (curva estándar, en adelante denominada Std Curve, curva roja), según lo reportado por Harrison (2013). Este comportamiento es consistente con lo observado por otros investigadores (Telang, 1930; Bennett y Harrison, 2007; Karagioras y Kourtidis, 2021). Debido a las fluctuaciones significativas del PG inducidas por la precipitación, los días con lluvia fueron excluidos del análisis posterior.

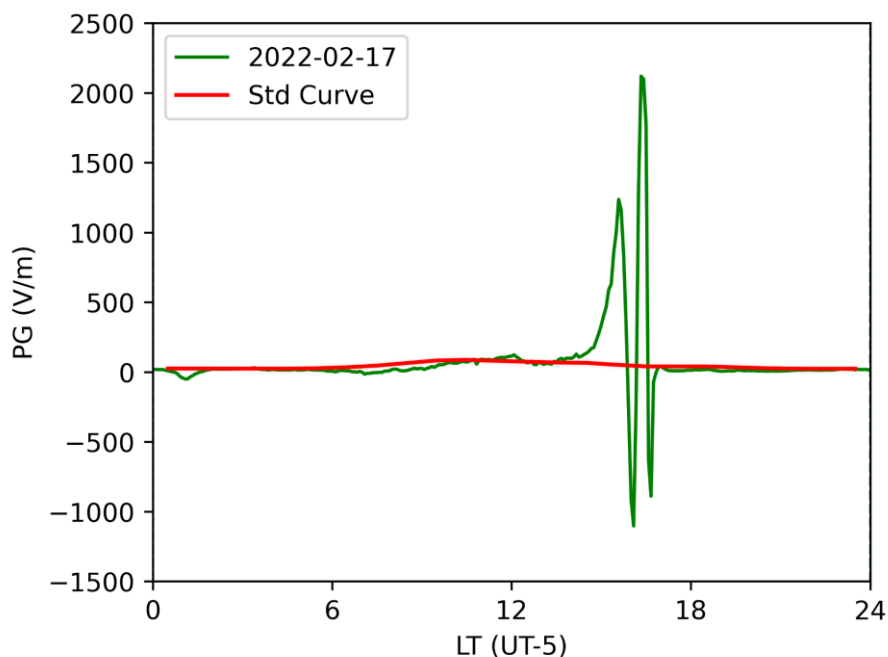


Figura 4. Variación típica del PG durante un evento de precipitación en Ica. La curva verde representa la variación diaria del PG el 17 de febrero de 2022. La curva roja muestra el promedio mensual medio bajo condiciones de buen tiempo reportado por Harrison (2013). La resolución temporal es de 5 minutos.

3.1.2. Velocidad del viento

Como se explicó en la Sección 2.1, la estación de Ica se encuentra en una región caracterizada por un clima desértico con vientos intensos. Los vientos en Ica están fuertemente influenciados por la topografía local y por la brisa marina (Haney y Grolier, 1991; Gay, 2005; Dávila, 2021). Las Figuras 5a a 5f presentan diagramas hexbin que ilustran la relación entre el PG y la velocidad del viento. Este tipo de gráfico fue seleccionado por su eficacia para representar la densidad de puntos de datos, la cual se indica en escala logarítmica para mayor claridad.

La Figura 5 muestra la variación del PG en respuesta a vientos fuertes, analizada (a) de manera anual y (c–f) de forma estacional, lo cual puede atribuirse al transporte de aerosoles provenientes de diversas fuentes. En primavera (Figura 5f), la mayor dispersión del PG probablemente se deba a vientos más intensos, impulsados por la proximidad del Anticiclón del Pacífico Sur (SPA) a la costa, cuya influencia es más pronunciada en invierno y primavera (Correa et al., 2020; Dewitte et al., 2011). Aunque el SPA intensifica los vientos costeros en invierno, la configuración específica del terreno y el microclima de Ica (ubicada a 60 km de la costa y dentro de un valle) podrían atenuar su influencia en esta región, resultando en una menor dispersión del PG. Con la llegada de la primavera y el consecuente aumento de las temperaturas, ocurre un cambio notable en los patrones de viento, reforzando la dispersión del PG. Esta tendencia disminuye en verano y otoño, en concordancia con la menor influencia del SPA.

Es particularmente relevante la Figura 5b, que muestra la relación entre el valor absoluto del PG y la velocidad del viento, utilizando un promedio de 60 minutos. Se observa un incremento exponencial claro del PG más allá de un umbral de velocidad de 3.5 m/s, reflejando un patrón consistente tanto para polaridades positivas como negativas del PG. Gay (2005) analizó los complejos patrones de viento en la región, señalando que los vientos del noroeste transportan arena y polvo desde las playas, mientras que los vientos del sur trasladan partículas de distinta naturaleza. Estas dinámicas contribuyen significativamente a la acumulación de arena en el banco arenoso de Ica, el cual recibe material desde múltiples direcciones, cubriendo un arco angular de aproximadamente 140 grados.

De manera similar, Briceño-Zuluaga et al. (2017) analizaron las tormentas de polvo tipo Paracas en la región Pisco-Ica e identificaron múltiples fuentes de arena y polvo ubicadas al norte, oeste y sur de Ica, utilizando imágenes MODIS y trayectorias del modelo HYSPLIT. El efecto combinado de estos patrones de viento puede modificar los niveles de material particulado y, en consecuencia, producir variaciones en el PG.

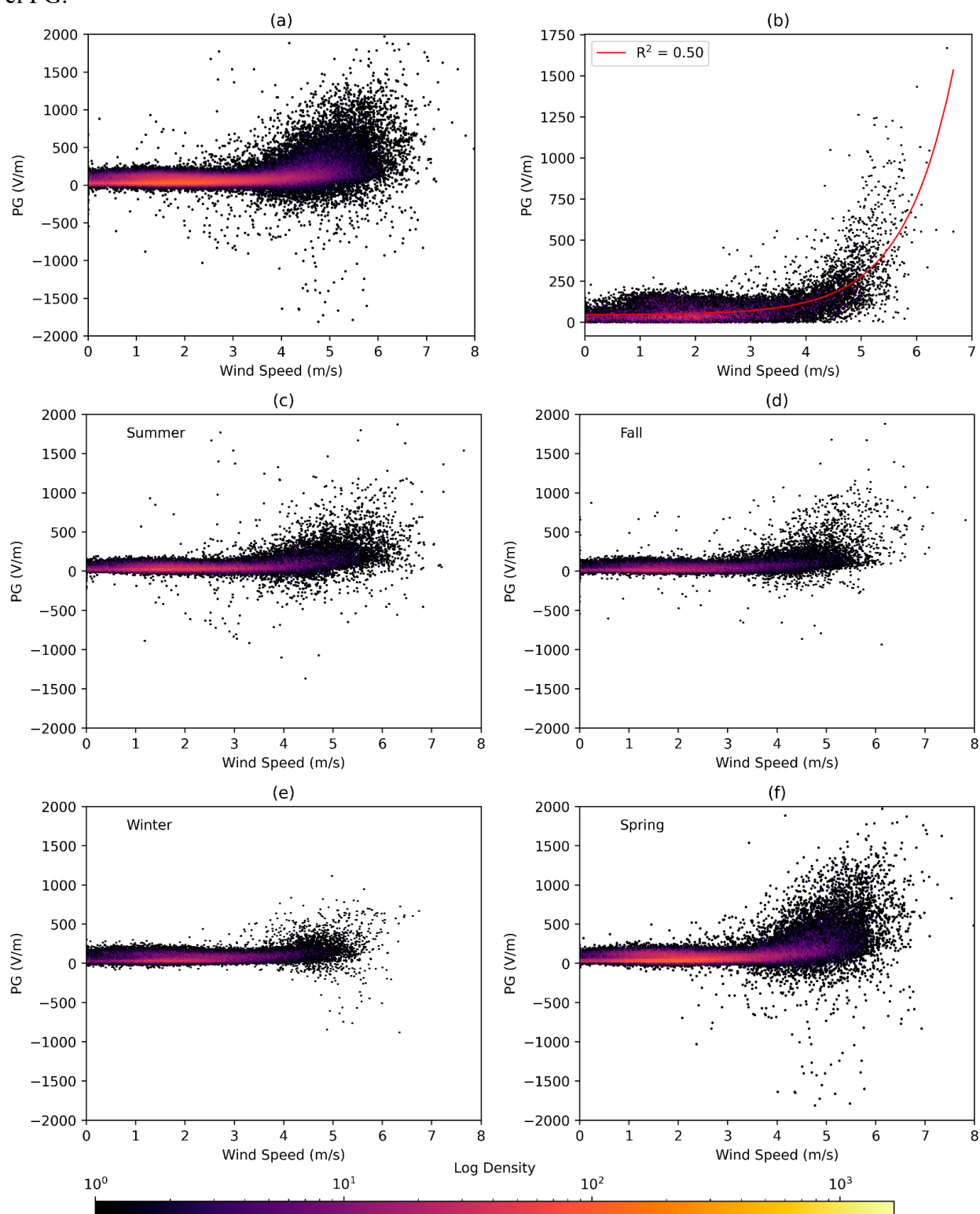


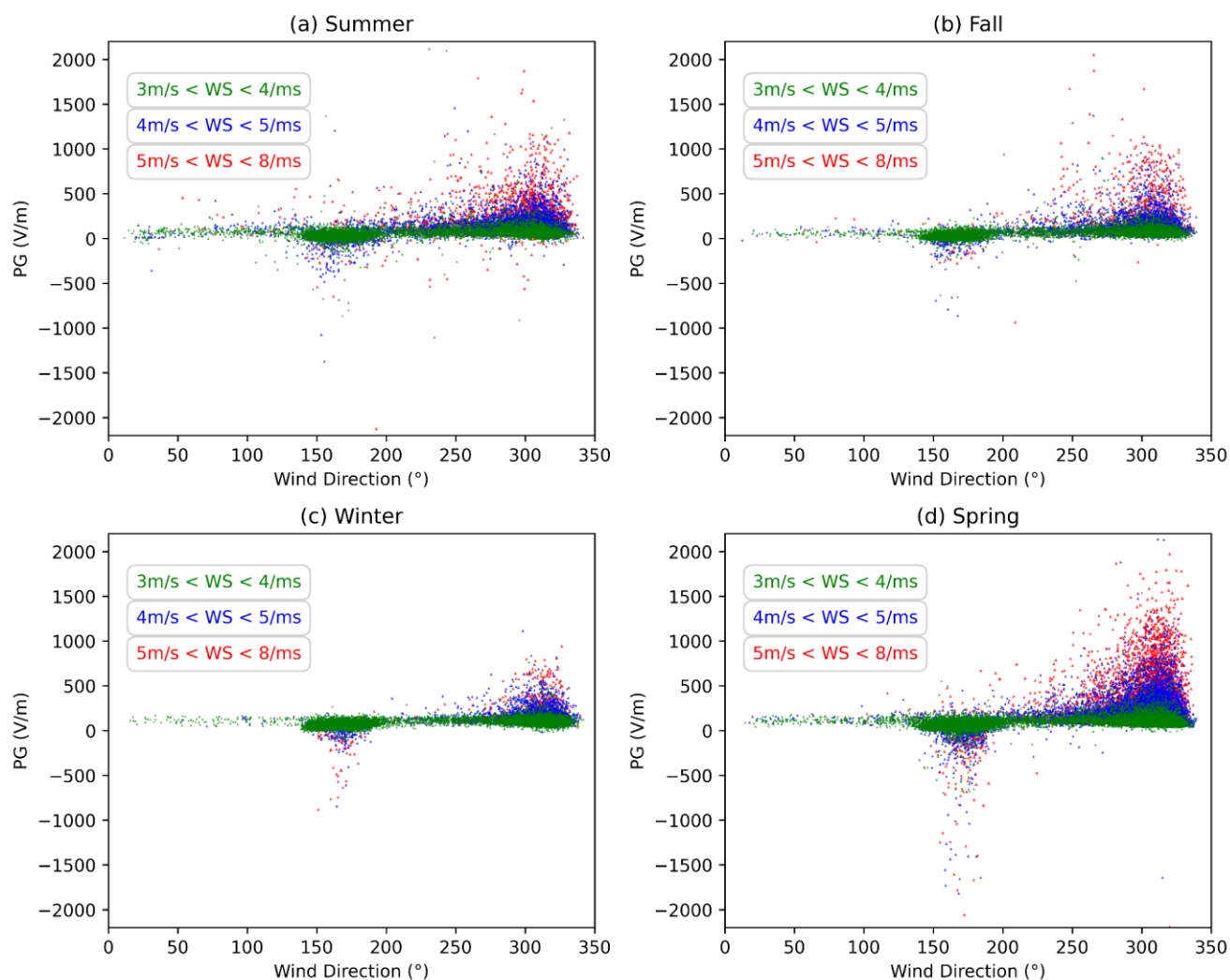
Figura 5. Diagrama hexbin que muestra la relación entre el PG y la velocidad del viento para todo el período con promedio de 5 minutos (a). Diagrama hexbin que presenta la relación entre el valor absoluto del PG y la velocidad del viento, promediado en intervalos de 60 minutos, evidenciando una tendencia exponencial con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.50$ (b). Las variaciones estacionales se muestran

310 en (c–f) utilizando un promedio de 5 minutos. En todos los casos se excluyeron del análisis los días con
311 precipitación.

312

313 Con base en los resultados mostrados en la Figura 5, se estableció un umbral de velocidad del viento de
314 3.5 m/s, a partir del cual el PG comienza a presentar perturbaciones significativas. Posteriormente, se
315 construyó un gráfico de dispersión para evaluar la posible procedencia común del polvo o arena
316 transportados por el viento. La Figura 6 muestra la variación del PG en función de la dirección del viento
317 para las diferentes estaciones del año, donde se observa el mismo comportamiento estacional (vientos
318 más intensos en primavera), asociado a la proximidad del Anticiclón del Pacífico Sur (SPA). Se
319 excluyeron velocidades del viento menores a 3 m/s con el fin de eliminar valores representativos de
320 condiciones de buen tiempo. Se identifican direcciones de viento distintivas, particularmente sur-sureste
321 (SSE) y noroeste (NW), que generan polaridades diversas en el PG. Es importante destacar que los días
322 caracterizados por vientos fuertes del noroeste (NW) presentaron generalmente cielos despejados, lo
323 cual fue corroborado tanto mediante datos de irradiancia de la estación meteorológica como por
324 observación directa. En contraste, los días dominados por vientos intensos del sur-sureste (SSE)
325 mostraron reducción de visibilidad debido a la ocurrencia de tormentas de polvo tipo Paracas. A partir
326 de estos resultados, y considerando los aportes de Gay (2005) y Briceño-Zuluaga et al. (2017), se puede
327 establecer una correlación entre los vientos fuertes del NW y la brisa marina, y entre los vientos intensos
328 del SSE y las tormentas de polvo Paracas.

329



330

331 **Figura 6.** Diagramas de dispersión estacionales que muestran la relación entre el PG y la dirección del
332 viento, utilizando un promedio de 5 minutos. Los puntos verdes representan velocidades entre 3 y 4 m/s,
333 los azules entre 4 y 5 m/s y los rojos entre 5 y 8 m/s. Se excluyeron los días con precipitación y los datos
334 con velocidades menores a 3 m/s.

335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365

Las Figuras 7 y 8 presentan dos eventos representativos caracterizados por vientos fuertes del NW y del SSE, respectivamente, los cuales muestran efectos diferenciados sobre el PG. La Figura 7a muestra los valores de PG del 18 de noviembre de 2022, día seleccionado por el notable incremento del PG, probablemente asociado a una brisa marina intensa. La Figura 7b indica que la velocidad del viento alcanzó un máximo de 7 m/s, en concordancia con el aumento del PG. La Figura 7c presenta la dirección del viento, evidenciando un patrón consistente entre las 13 y 20 horas (LT), lo que permite identificar la duración del evento de brisa marina.

Un segundo caso de brisa marina ocurrió el 7 de noviembre de 2022. Las Figuras 7d, 7e y 7f muestran, respectivamente, la variación del PG, la velocidad del viento y la dirección del viento durante ese día. La velocidad máxima alcanzó 6 m/s, coincidiendo con el incremento del PG. La Figura 7f permite observar la duración del evento mediante la estabilidad en la dirección del viento. Por otro lado, la Figura 8a presenta los valores de PG del 1 de septiembre de 2022, día seleccionado por la marcada disminución del PG, atribuida a un evento de viento Paracas. La Figura 8b muestra que la velocidad del viento se mantuvo elevada durante gran parte del día, alcanzando un máximo de 7 m/s, mientras que la Figura 8c evidencia una dirección del viento constante proveniente del SSE.

Otro caso de vientos Paracas ocurrió el 12 de enero de 2022, mostrado en las Figuras 8d, 8e y 8f. En este evento, la velocidad máxima fue menor (5 m/s), como se observa en la Figura 8e. La Figura 8f confirma el predominio de vientos del SSE durante el evento.

En la Figura 9 se utilizó la herramienta HYSPLIT para verificar el origen de las masas de aire que alcanzaron la estación de Ica, asociadas al transporte de aerosoles durante el evento de brisa marina del 18 de noviembre de 2022 y el evento Paracas del 1 de septiembre de 2020. Las horas seleccionadas corresponden al momento en que el PG alcanzó su amplitud máxima.

Las trayectorias retrógradas se representan en rojo/púrpura, azul/naranja y verde/amarillo, correspondientes a altitudes de 100, 300 y 500 metros sobre el nivel del suelo, respectivamente. Este análisis valida la fuente del polvo y arena en suspensión para cada evento, en concordancia con las observaciones registradas en la estación meteorológica.

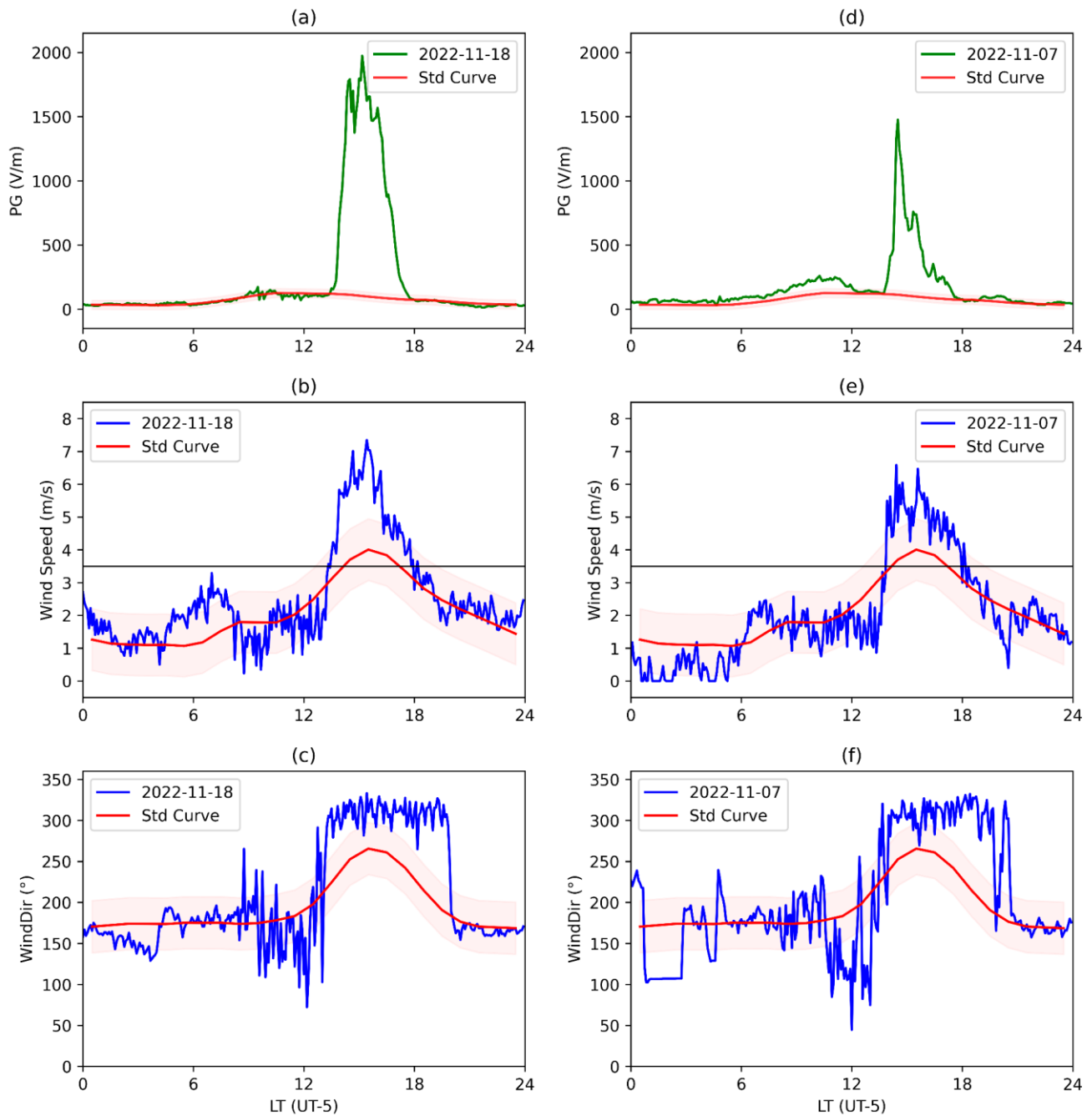


Figura 7. (a) Variación diaria del PG, (b) velocidad del viento y (c) dirección del viento el 18 de noviembre de 2022. Los paneles (d), (e) y (f) muestran las mismas variables correspondientes al 7 de noviembre de 2022. En ambos casos de estudio se reportó una brisa marina intensa. La curva roja representa la variación diaria media mensual de cada parámetro bajo condiciones de buen tiempo, y las barras de error indican una desviación estándar.

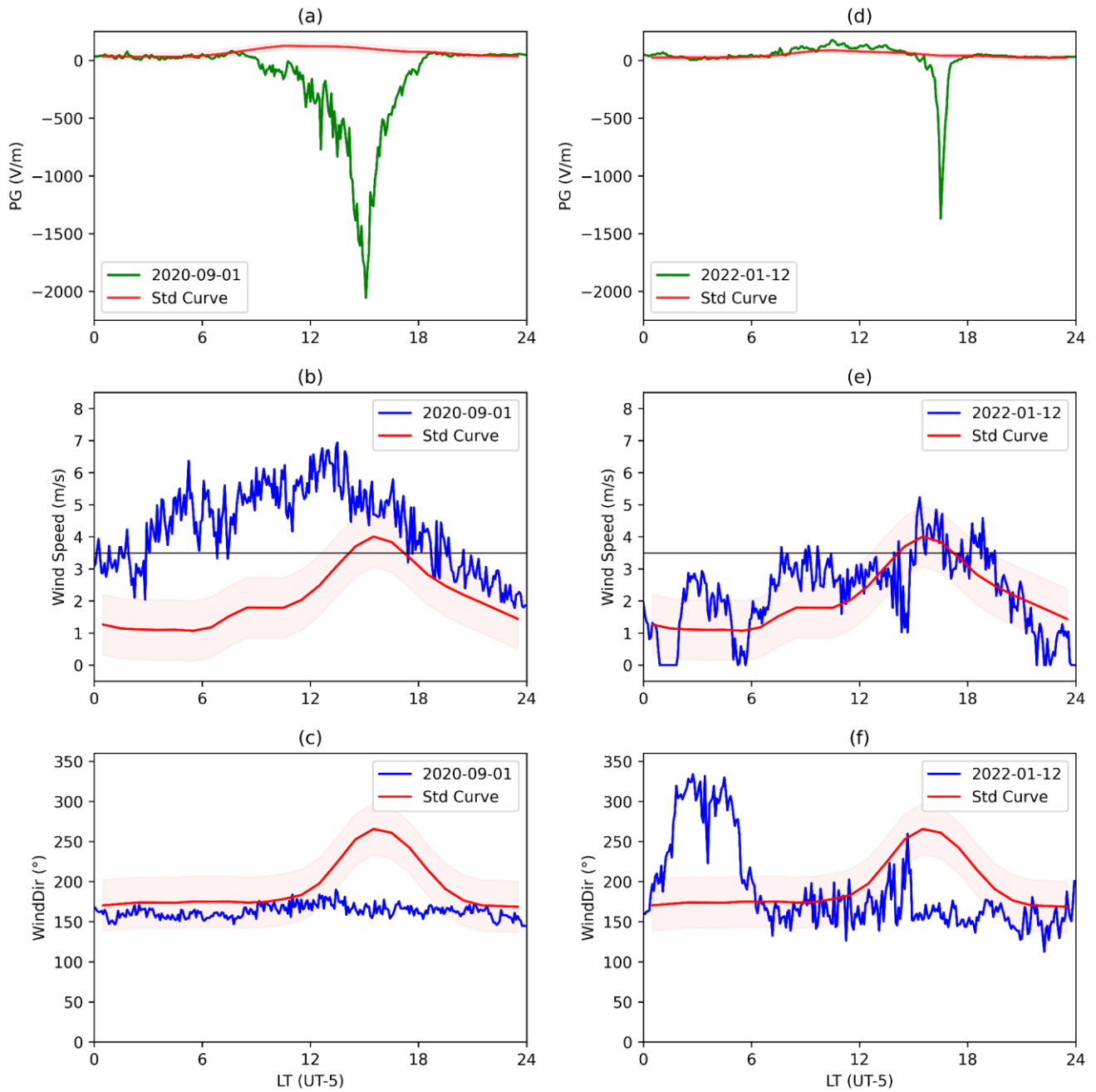
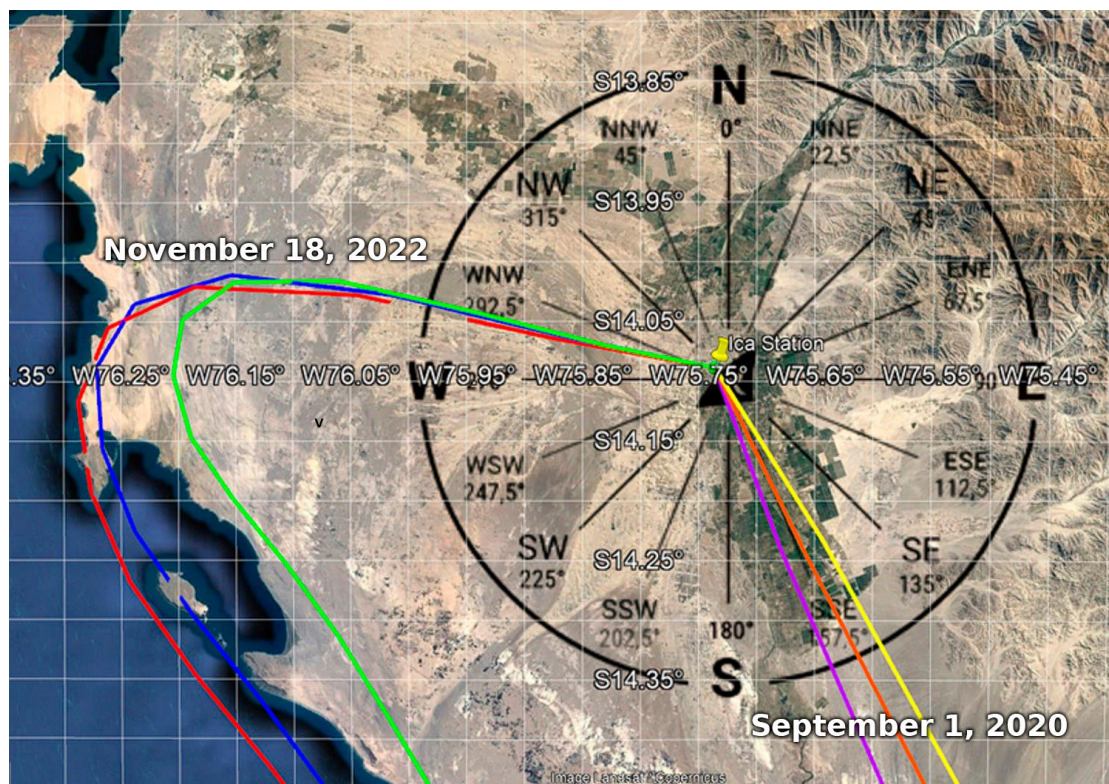


Figura 8. (a) Variación diaria del PG, (b) velocidad del viento y (c) dirección del viento el 1 de septiembre de 2020. Los paneles (d), (e) y (f) muestran las mismas variables correspondientes al 12 de enero de 2022. En ambos casos se reportó una tormenta de polvo tipo Paracas. La curva roja representa la variación diaria media mensual de cada parámetro bajo condiciones de buen tiempo, y las barras de error indican una desviación estándar.



383
384

385 **Figura 9.** Análisis de trayectorias retrógradas de las masas de aire que alcanzaron la estación de Ica el
386 18 de noviembre de 2022, representadas en colores rojo, azul y verde claro, y el 1 de septiembre de
387 2020, representadas en púrpura, naranja y amarillo. El mapa fue generado utilizando la herramienta
388 HYSPLIT. El rojo/púrpura corresponde a masas de aire a 100 metros sobre el nivel del suelo, el
389 azul/naranja a 300 metros y el verde claro/amarillo a 500 metros.

390

391 La brisa marina fue responsable de incrementos del PG en aproximadamente el 44% de los días por año,
392 mientras que los vientos intensos del SSE y una baja densidad de polvo en el ambiente provocaron
393 disminuciones del PG en el 12% de los días por año. De manera interesante, el 84% de estos días con
394 disminución del PG no presentaron una reducción concurrente de la visibilidad, según la evaluación
395 visual mediante una cámara orientada hacia el sensor. Es importante señalar que esta observación no
396 descarta la presencia de polvo en el ambiente. Adicionalmente, se registraron 10 eventos de tormentas
397 de polvo tipo Paracas, caracterizados por una reducción sustancial de la visibilidad. La disminución del
398 PG previa a una tormenta de polvo, asociada a la presencia de polvo en suspensión, ha sido ampliamente
399 documentada en la literatura (Rudge, 1913; Kamra, 1972; Zhang et al., 2017).

400

401 En cuanto a la variación estacional, la ocurrencia de la brisa marina alcanza su máximo en verano y
402 primavera (59% de los días en ambas estaciones) y su mínimo en invierno (18%). Por su parte, los
403 eventos de polvo presentan una frecuencia máxima en primavera (18% de los días) y mínima en invierno
404 (6%). Este comportamiento es coherente con la dispersión del PG mostrada en la Figura 5. Las Figuras
405 10a, 10b y 10c presentan histogramas de la distribución del PG, la dirección del viento y la velocidad
406 del viento, respectivamente, durante las horas en que ocurrieron tormentas de polvo tipo Paracas. De
407 manera similar, las Figuras 10d, 10e y 10f muestran la variación de los mismos parámetros durante
408 eventos de brisa marina intensa. Para ambos fenómenos (tormentas de polvo y brisa marina), se
409 seleccionaron los 13 eventos más intensos.

410

411 Los días con brisa marina presentan amplitudes de PG de hasta 2000 V/m, mientras que los días con
412 tormentas de polvo Paracas muestran amplitudes de hasta -2000 V/m. Asimismo, se observa una clara
413 concentración de vientos del sur ($\approx 160^\circ$) durante las tormentas Paracas, mientras que los vientos del
414 noroeste ($\approx 310^\circ$) predominan durante los eventos de brisa marina.

Es importante destacar que los umbrales de velocidad del viento difieren entre ambos fenómenos: los días con brisa marina requieren aproximadamente 4 m/s, mientras que las tormentas Paracas presentan un umbral menor, posiblemente debido a diferencias en el origen de las corrientes de aire.

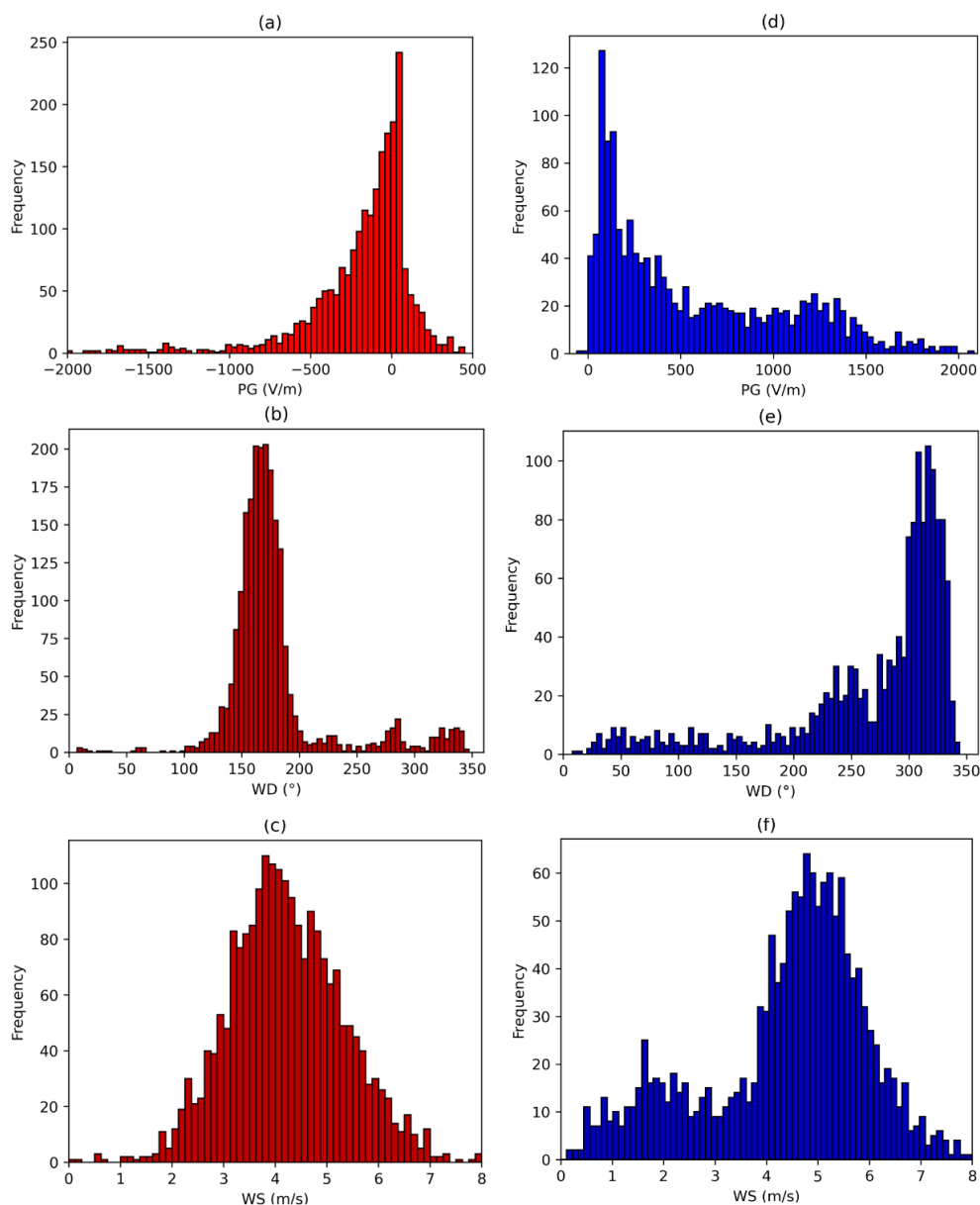


Figura 10. En rojo: histogramas que muestran la distribución de (a) PG, (b) dirección del viento y (c) velocidad del viento para 13 días con disminuciones de PG asociadas a tormentas de polvo Paracas. En azul: histogramas que muestran la distribución de (d) PG, (e) dirección del viento y (f) velocidad del viento para 13 días con incrementos de PG asociados a brisa marina intensa.

3.1.3 Dust Devils

En la estación de Ica se observaron desviaciones del PG durante el paso de varios *dust devils* en proximidad al sensor. En este estudio se analizaron tres eventos destacados, como se muestra en las Figuras 11 y 12. Los incrementos de PG de aproximadamente 4 segundos observados en la Figura 11a pueden atribuirse a la influencia de una región con carga positiva dentro del *dust devil*, lo que produjo un aumento del PG. Estos resultados son consistentes con las observaciones de Lorenz et al. (2016), quienes documentaron una firma característica de corriente eléctrica en diversos eventos de *dust devils*:

la corriente aumenta a medida que el vórtice se aproxima a su punto de máxima cercanía y posteriormente evoluciona hacia una corriente negativa decreciente conforme se aleja.

En la parte derecha de la Figura 11a se presenta una fotografía del *dust devil* en su punto de mayor proximidad al sensor EFM, coincidiendo con el instante de máxima variación del PG. Es importante destacar que en este evento el *dust devil* no pasó directamente sobre el sensor, lo que explica que solo se haya registrado un incremento del PG debido a la influencia de la carga espacial positiva sobre el instrumento.

Por otro lado, la Figura 11b muestra una medición típica del PG cuando un *dust devil* pasa directamente sobre el sensor. La disminución del PG durante aproximadamente 20 segundos puede atribuirse al apantallamiento del sensor por una nube de polvo que transporta carga negativa debido al efecto triboeléctrico, generando un campo orientado hacia arriba. Este fenómeno ha sido ampliamente reportado en la literatura (Freier, 1960; Farrell et al., 2004; Crozier, 1964, 1970; Bo y Zheng, 2013). La Figura 12 presenta el *dust devil* más grande y de mayor duración registrado durante el período de estudio. Se observan dos patrones diferenciados en la variación del PG: primero, una disminución gradual cuando el *dust devil* se encontraba a decenas de metros, pero a suficiente altura como para dispersar polvo cerca del sensor EFM; luego, un incremento conforme se aproximó a pocos metros, culminando en una caída máxima al alcanzar el sensor.

El comportamiento inicial, caracterizado por una disminución gradual hasta un primer mínimo de -3000 V/m, podría explicarse porque a esa distancia el *dust devil* actúa como una pequeña tormenta de polvo, fenómeno que se ha demostrado tiene un efecto negativo consistente sobre el sensor. Sin embargo, la recuperación hasta -2000 V/m cuando el *dust devil* se aproxima más al sensor sería coherente con la transferencia de corriente positiva descrita por Lorenz et al. (2016), hasta que finalmente alcanza el sensor y provoca la caída máxima del PG debido a la influencia de su base cargada negativamente, como se observa en la Figura 12d.

Si bien este estudio aporta resultados relevantes, es importante considerar aspectos que podrían fortalecerse en futuras investigaciones. La estación meteorológica, ubicada a 50 metros del sensor de PG, no se encontraba en la trayectoria directa de los *dust devils*, lo que limitó la obtención de mediciones directas de estos eventos. Además, la configuración instrumental actual no incluía equipos especializados como sensores de corriente eléctrica o trampas de polvo. Estos instrumentos serían fundamentales para un análisis más detallado de la composición y las propiedades eléctricas de los *dust devils*. Estudios futuros que incorporen un conjunto más amplio de sensores, incluyendo medición directa de corriente y análisis de partículas, permitirían profundizar en la caracterización eléctrica de estos fenómenos, aportando información más completa sobre su composición, distribución de carga, dinámica y su interacción con el PG.

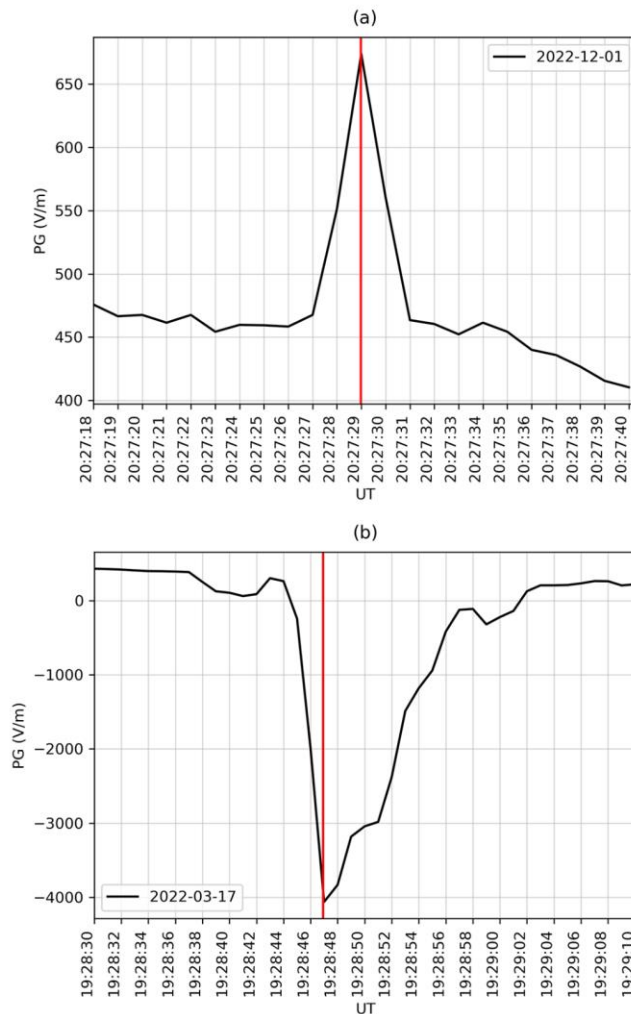


Figure 11. (a) Incrementos de PG producidos por un dust devil que pasó cerca del sensor EFM. (b) Disminuciones de PG causadas por un dust devil que pasó directamente sobre el sensor EFM. Las líneas verticales rojas indican la variación máxima del PG y el instante correspondiente a la fotografía mostrada a la derecha. Es importante destacar que la duración de la variación intensa del PG es extremadamente corta, del orden de pocos segundos.

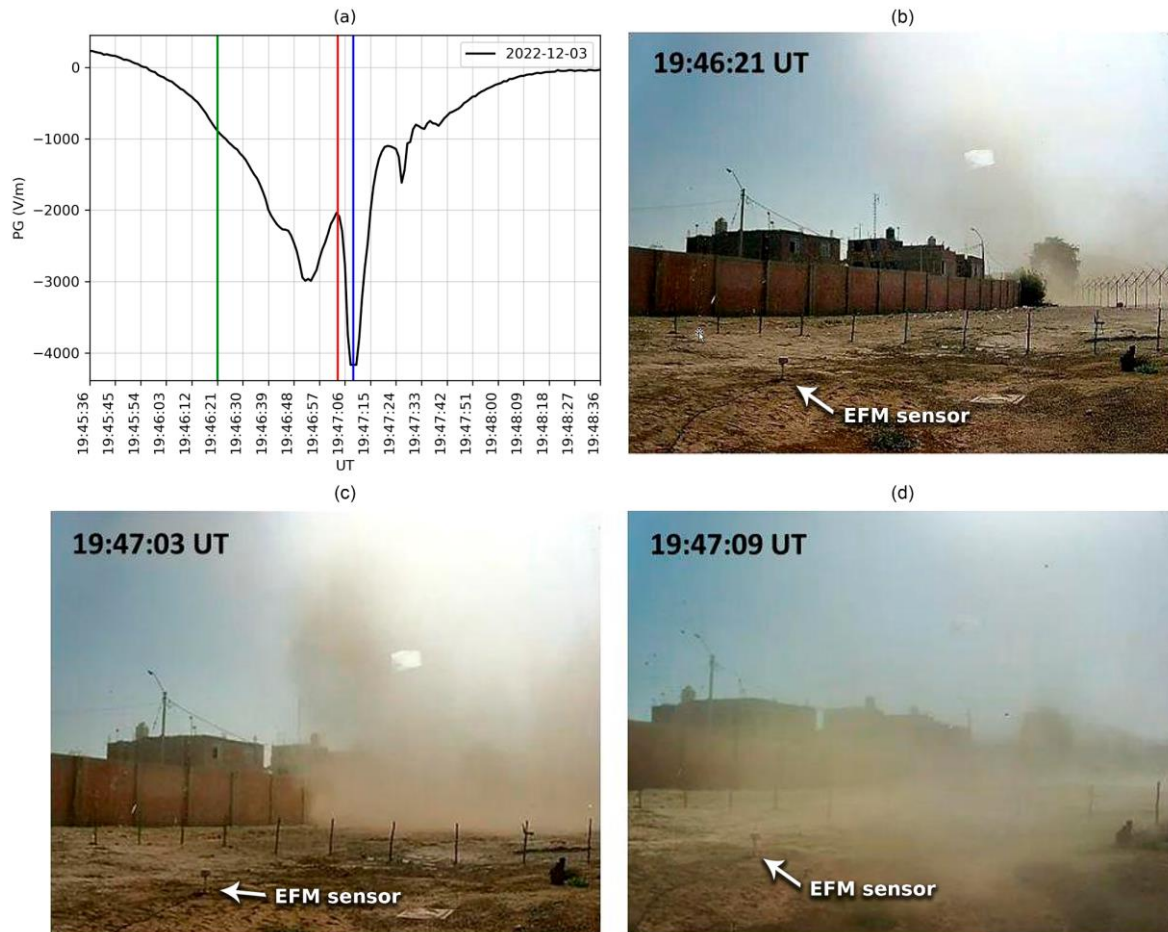


Figura 12. (a) Variación del PG mostrando las fluctuaciones observadas cuando un dust devil pasa cerca y posteriormente sobre el sensor, incluyendo una fotografía tomada exactamente en el instante de máxima subida y máxima caída del PG. Las imágenes (b), (c) y (d) corresponden a los momentos indicados por las líneas verticales verde, roja y azul, respectivamente.

3.1.4 Niebla

Es ampliamente reconocido por diversos autores que el PG tiende a incrementarse durante eventos de niebla debido a la disminución de la conductividad eléctrica causada por la presencia de gotas de agua suspendidas en el aire (Anisimov et al., 2005; Bennett y Harrison, 2009; Yair y Yaniv, 2023). Por esta razón, se investigó la influencia de la niebla sobre los valores de PG registrados en Ica.

Las Figuras 13a, 13b y 13c muestran la variación diaria de la humedad relativa, la velocidad del viento y el PG durante un evento de niebla densa ocurrido el 28 de junio de 2021. Este caso fue identificado mediante una fotografía tomada en el sitio de medición a las 07:43 LT (Figura 13d). Las observaciones indican que los valores de PG tienden a aumentar cuando la humedad relativa alcanza el 100% y la velocidad del viento es inferior a 2 m/s.

Por otro lado, la Figura 14 presenta otro caso ocurrido el 20 de julio de 2021, cuando la niebla fue menos densa (Figura 14d). En este evento no se observa un incremento significativo del PG incluso cuando la humedad relativa alcanza el 100%; sin embargo, se registran oscilaciones del PG. Cabe señalar que la velocidad del viento se mantiene entre 2 y 3 m/s. Estas oscilaciones probablemente se deben al movimiento irregular de la niebla al interactuar con el sensor, alternando entre condiciones despejadas y neblinosas. Resultados similares fueron reportados por Yair y Yaniv (2023).

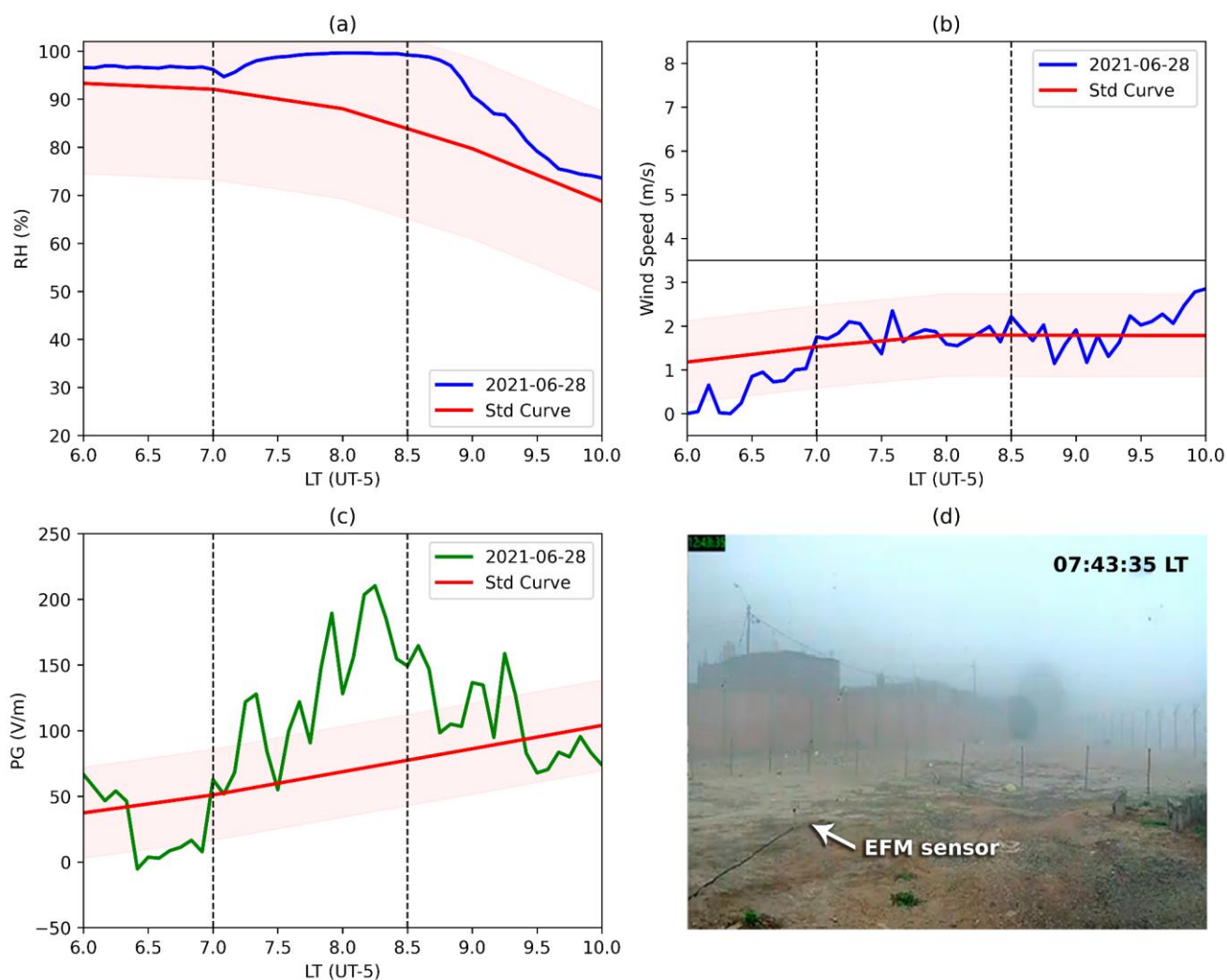
Las nubes y la niebla son manifestaciones visibles del agua atmosférica que difieren únicamente en su altitud. La niebla puede considerarse como una nube estratiforme situada cerca del suelo (Lakra y

512 Avishek, 2022). En Ica, el 95% de los días con niebla presentan variaciones de PG similares a las
 513 observadas por Harrison et al. (2008, 2017) durante aproximadamente el 40% de los días de invierno.
 514 Estos estudios demostraron que cambios rápidos en la altura de la base de las nubes afectan el PG, debido
 515 a la carga negativa dominante presente en las capas inferiores de las nubes. En contraste, solo el 5% de
 516 los días con niebla muestran un incremento sostenido del PG sin oscilaciones.

517
 518 La niebla es frecuente en Ica durante la estación de invierno (junio a agosto). Además, se utilizó la
 519 proximidad del sensor a una duna y los criterios establecidos por el Glossary of Meteorology (AMS,
 520 2023) para distinguir entre niebla y neblina en función de la visibilidad de la duna. Aunque ambos
 521 eventos presentados podrían clasificarse como niebla, producen efectos diferentes sobre el PG.

522
 523 Durante el período de estudio de cuatro años se registraron más de cien días caracterizados por
 524 oscilaciones del PG (como se observa en las Figuras 3b y 14c) asociadas a niebla y neblina. En contraste,
 525 los casos de incrementos sostenidos del PG específicamente vinculados a niebla fueron relativamente
 526 poco frecuentes.

527



528
 529 **Figura 13.** (a) Humedad relativa, (b) velocidad del viento y (c) variación del PG durante un evento de
 530 niebla densa ocurrido el 28 de junio de 2021. Las líneas rojas representan la variación mensual de cada
 531 parámetro bajo condiciones de buen tiempo, y el área sombreada indica una desviación estándar. (d)
 532 Fotografía tomada a las 07:43 LT.

533

534

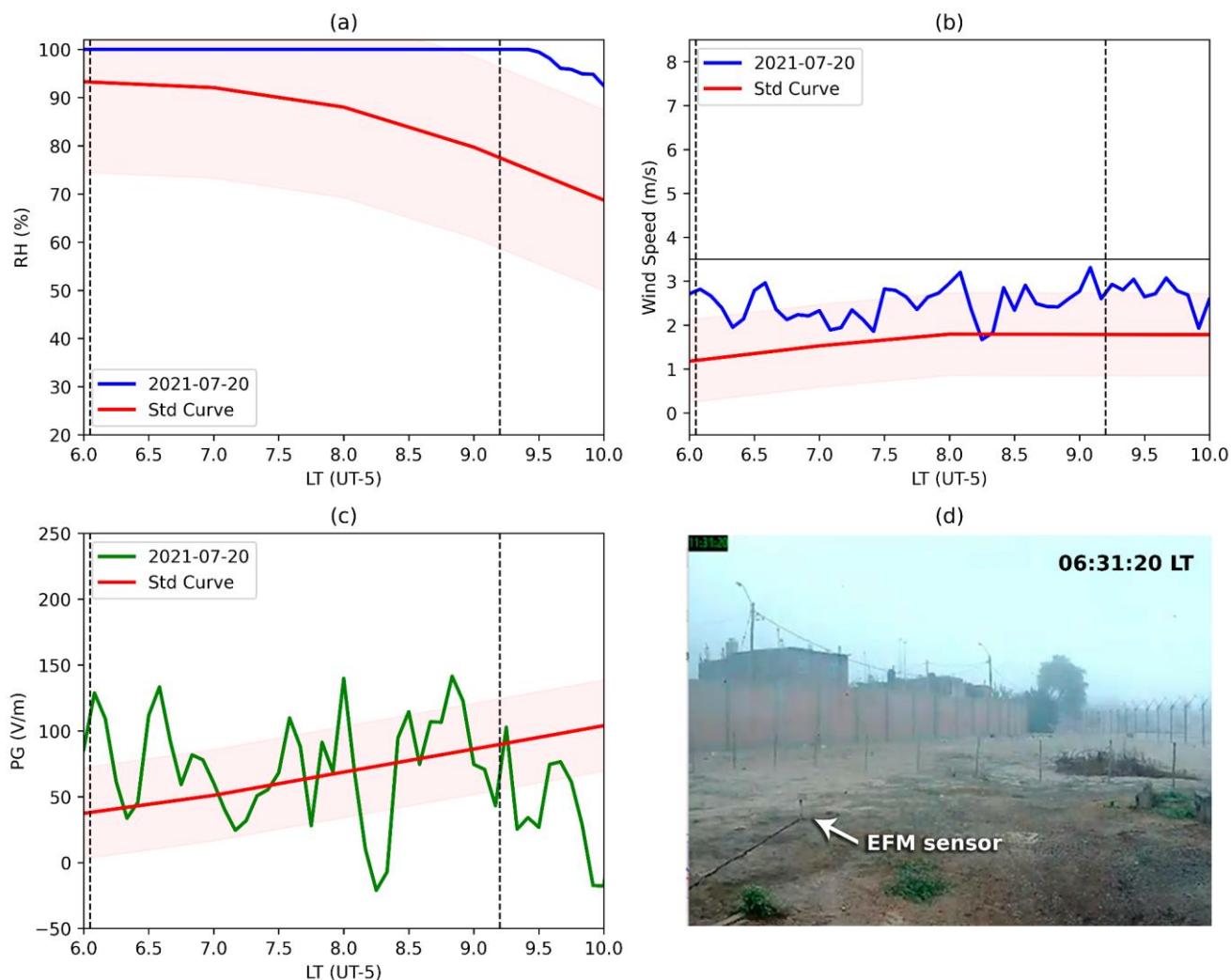


Figure 14. (a) Relative humidity, (b) wind speed, and (c) PG variation during a dense fog event that occurred on July 20, 2021. The red lines represent the monthly variation, for each parameter, under fair weather conditions. The shaded area indicates one standard deviation. (d) Photo taken at 6:31 LT.

3.2. Curvas estándar mensuales, estacionales y anuales

Tras identificar correctamente el impacto de los fenómenos meteorológicos sobre el PG, se establecieron los siguientes criterios para la construcción de las curvas estándar mensuales, estacionales y anuales. En la estación de Ica se aplicaron las siguientes condiciones de “buen tiempo”: valores de PG con humedad relativa (RH) < 90%, velocidad del viento < 3.5 m/s y ausencia de precipitación. A este proceso de filtrado lo denominamos criterio meteorológico. La Figura 15 muestra las curvas estándar mensuales del PG obtenidas tras aplicar el criterio meteorológico. Las barras de error representan una desviación estándar. Se observa una variación gradual entre estaciones, con los valores más altos de PG en julio (invierno en el hemisferio sur) y los más bajos en febrero (verano en el hemisferio sur). Esta tendencia se aprecia claramente en la Figura 16.

La Figura 16a presenta las curvas estándar estacionales del PG, con áreas sombreadas que indican una desviación estándar. Se observa una diferencia notable en la amplitud del PG entre verano (diciembre, enero, febrero) e invierno (junio, julio, agosto). Estos resultados son similares a los reportados por Gurmani et al. (2018) en Pakistán y por Lei Li et al. (2023) en China, el Reino Unido y Grecia. Dichos autores señalaron que las variaciones estacionales de aerosoles y material particulado fino (PM_{2.5}) podrían explicar la variación estacional del PG. En el caso específico del Perú, Estevan et al. (2019) reportaron la ocurrencia de quema de biomasa entre julio y octubre, lo cual respalda las diferencias estacionales observadas en el PG.

La Figura 16b muestra la curva estándar anual del PG obtenida mediante el criterio meteorológico (curva negra). Además, se incluye el promedio anual calculado utilizando un rango de PG entre 0 y 170 V/m (considerando el histograma mostrado en la Figura 2b). A este procedimiento lo denominamos criterio observacional (curva roja), el cual sigue la metodología empleada por Tacza et al. (2020). En ambos casos, las barras de error representan una desviación estándar. Se observa un alto grado de concordancia entre el criterio meteorológico y el criterio observacional ($R^2 = 0.97$). Este resultado sugiere que en sitios donde no se disponga de estaciones meteorológicas, el criterio observacional puede ser útil para estimar curvas de PG representativas de condiciones de buen tiempo.

Con el fin de analizar posibles efectos globales en la curva diurna del PG en Ica, se utilizó la curva universal de Carnegie como referencia. La Figura 17a presenta la curva estándar estacional del PG en Ica comparada con la curva de Carnegie. El eje X corresponde al Tiempo Universal (UT). Las líneas verticales punteadas indican las horas 3, 8, 14 y 19 UT, que representan características de la variación global de tormentas eléctricas: mínimo a las 3 UT, máximo del “chimney” Asia/Australia a las 8 UT, máximo África/Europa a las 14 UT y máximo de las Américas a las 19 UT.

Aunque se obtiene una correlación de Pearson aceptable entre las curvas estándar estacionales del PG y la curva de Carnegie ($R = 0.88$ en verano, $R = 0.91$ en primavera, $R = 0.93$ en otoño y $R = 0.87$ en invierno), no existe coincidencia en los tiempos característicos de mínimos y máximos asociados a la variación global de tormentas eléctricas. En Ica, la variación del PG muestra un mínimo amplio entre aproximadamente 3 y 10 UT, y un máximo a las 15 UT en verano, primavera y otoño, y a las 17 UT en invierno. Estos resultados sugieren que la variación diurna del PG en Ica está más asociada a efectos locales que a influencias globales.

La Figura 17b muestra la curva estándar anual del PG en Ica comparada con otras estaciones de PG a nivel mundial: Buenos Aires (Argentina), Gulmarg (India), Hermon (Israel), Dilijan (Armenia) y Al Ain (Emiratos Árabes Unidos). El eje X está expresado en hora local (LT) para cada sitio. Se observa una buena correlación de Pearson entre Ica y las demás estaciones: $R = 0.86$ (Ica–Buenos Aires), $R = 0.96$ (Ica–Hermon), $R = 0.94$ (Ica–Gulmarg), $R = 0.97$ (Ica–Dilijan) y $R = 0.92$ (Ica–Al Ain).

Además, en todas las estaciones se observa un incremento del PG después de aproximadamente 6–8 LT, alcanzando un máximo entre 10–12 LT, seguido de una disminución posterior. Este comportamiento es probablemente atribuible a procesos convectivos locales. Tras el amanecer, el aumento de temperatura favorece la convección ascendente y la turbulencia, lo que contribuye a dispersar gases radiactivos presentes a nivel del suelo, como el radón y sus productos de decaimiento, los cuales se adhieren a aerosoles. Como consecuencia, disminuye la conductividad eléctrica en superficie y el PG aumenta (Anisimov et al., 2018). Las diferencias en el rango porcentual del PG (porcentaje respecto a la media) entre estaciones probablemente estén asociadas a características específicas del entorno local: Buenos Aires = 59%, Hermon = 59%, Gulmarg = 61%, Al Ain = 89% e Ica = 134%. Cabe destacar que los valores más elevados corresponden a Ica y Al Ain, ambas ubicadas en zonas áridas.

La Figura 18 muestra la media diaria del PG bajo condiciones de buen tiempo utilizando el criterio meteorológico. La curva negra discontinua representa el promedio mensual. El patrón estacional se mantiene consistente en cada año. La discontinuidad de datos en 2020 se debe a la ausencia de registros simultáneos del sensor EFM y la estación meteorológica, necesarios para aplicar el criterio meteorológico. A partir de esta figura se observa que la variación estacional del PG sigue la variación global de tormentas eléctricas, con valores más altos en junio-julio-agosto y más bajos en diciembre-enero-febrero. En otras palabras, la variación estacional del PG coincide con la variación estacional del GEC. No obstante, es más probable que este comportamiento esté asociado a la quema de biomasa, más intensa entre julio y octubre (Estevan et al., 2019).

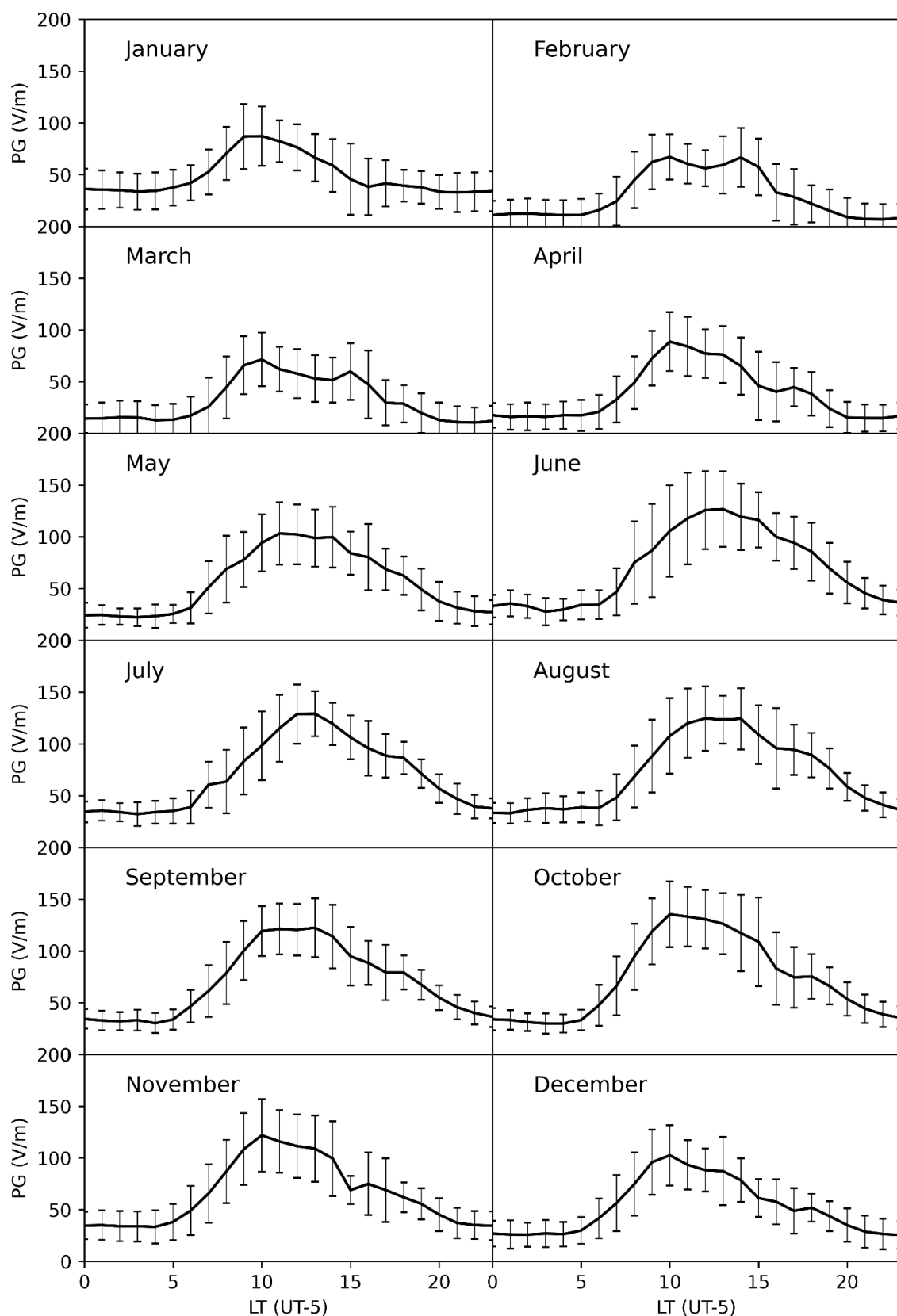


Figura 15. Curvas estándar mensuales del PG, utilizando el criterio meteorológico de buen tiempo, para el período comprendido entre 2019 y 2022. Las barras de error indican una desviación estándar.

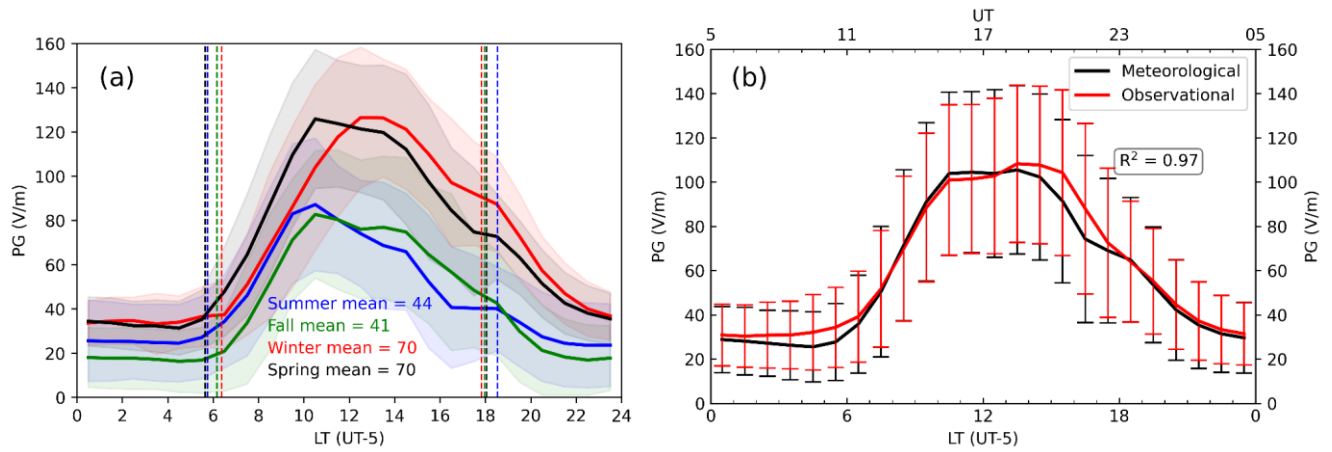


Figura 16. (a) Curvas estándar estacionales del PG, basadas en el criterio meteorológico de buen tiempo. Las áreas sombreadas representan una desviación estándar. Las líneas verticales discontinuas indican las horas de salida y puesta del sol para cada estación. (b) Curva estándar anual del PG utilizando el criterio meteorológico (negro) y el criterio observacional (rojo). Las barras de error representan una desviación estándar de la media (1σ). El período de estudio corresponde a 2019–2022.

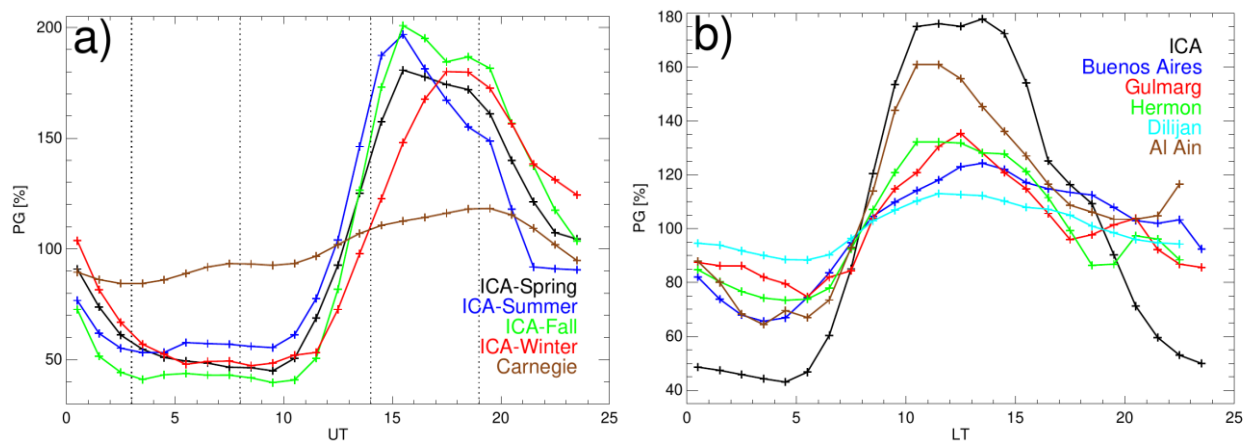


Figura 17. (a) Curvas estándar estacionales del PG en Ica comparadas con la curva de Carnegie, expresadas como porcentaje de la media, en Tiempo Universal (UT). Las líneas verticales punteadas indican las horas 3, 8, 14 y 19 UT. (b) Curva estándar anual del PG en Ica comparada con otras estaciones de PG a nivel mundial, expresada como porcentaje de la media, en Hora Local (LT). Véase el texto para más detalles.

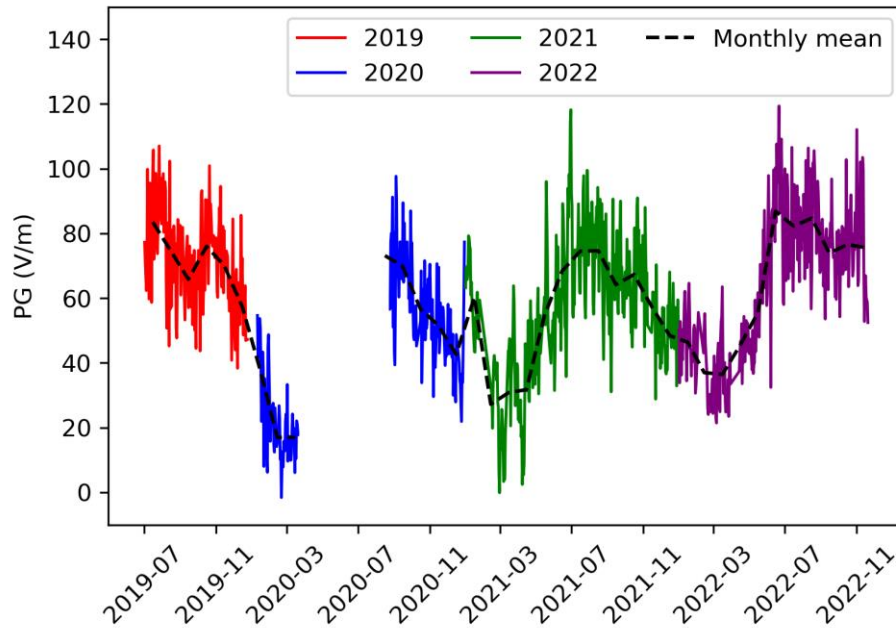


Figura 18. Promedios diarios del PG (líneas de color continuo) y promedios mensuales del PG (línea negra discontinua) bajo condiciones de buen tiempo utilizando el criterio meteorológico.

3.3 Análisis espectral

La Figura 19 presenta el análisis wavelet utilizando las amplitudes horarias del PG para todo el período de datos (desde marzo de 2018 hasta diciembre de 2022). Los valores de PG fueron seleccionados según el criterio observacional para minimizar vacíos de datos, es decir, valores positivos de PG en el rango de 0–170 V/m. En la Figura 19a se muestra la serie temporal, donde los vacíos corresponden a interrupciones en el suministro eléctrico. Para aplicar el análisis wavelet es necesario contar con un intervalo de tiempo constante entre muestras. Para completar estos vacíos, se calculó el promedio móvil de la serie temporal original con una ventana de 3,072 horas. Este procedimiento minimiza la introducción de artefactos en el análisis wavelet (Macotella et al., 2019).

La Figura 19b presenta el espectro de potencia wavelet continuo, corregido por escala (Liu et al., 2007). Los contornos representan la magnitud de la coincidencia entre las fases de la serie temporal y la wavelet. La barra de colores indica la amplitud de estos contornos, variando de azul a rojo. Las curvas negras delimitan el cono de influencia. La Figura 19c muestra el espectro global de potencia wavelet. La línea discontinua corresponde al nivel de confianza del 98% para un proceso de ruido rojo. Las potencias que superan esta línea se consideran significativas, y sus máximos están indicados por líneas horizontales discontinuas. Se observa que las periodicidades de 1 día, 45 días, 188 días y 360 días presentan significancia estadística. Las periodicidades de 1 día, 188 días y 360 días corresponden a las variaciones diurna, semianual y anual del PG, respectivamente. Esto ya se evidenciaba en las series temporales mostradas en las Figuras 15, 16, 17 y 18. Como se explicó anteriormente, estos períodos están asociados principalmente a efectos locales en la estación de Ica. Menos explorado en la literatura es el período de 45 días. Se observó que esta señal fue más intensa durante los primeros meses de 2018 (Figura 19b). Tacza et al. (2022) relacionaron este período con la Oscilación Madden-Julian (MJO), caracterizada por patrones acoplados de circulación atmosférica y convección profunda a gran escala. La MJO es el principal modulador de variaciones intraestacionales en la atmósfera tropical, por lo que no resulta sorprendente que pueda modular el GEC, como fue demostrado recientemente por Kozlov et al. (2023). Tacza et al. (2022) identificaron esta conexión entre PG y MJO mediante un análisis wavelet cruzado. Además, detectaron un período intenso similar de 45 días durante los primeros meses de 2018 en las estaciones de PG de Casleo (Argentina) y Sodankylä (Finlandia). El intervalo entre enero y marzo de 2018 ha sido catalogado como uno de los eventos de MJO más intensos (Barret, 2018). Estos resultados sugieren que en Ica también es posible observar la influencia global del GEC.

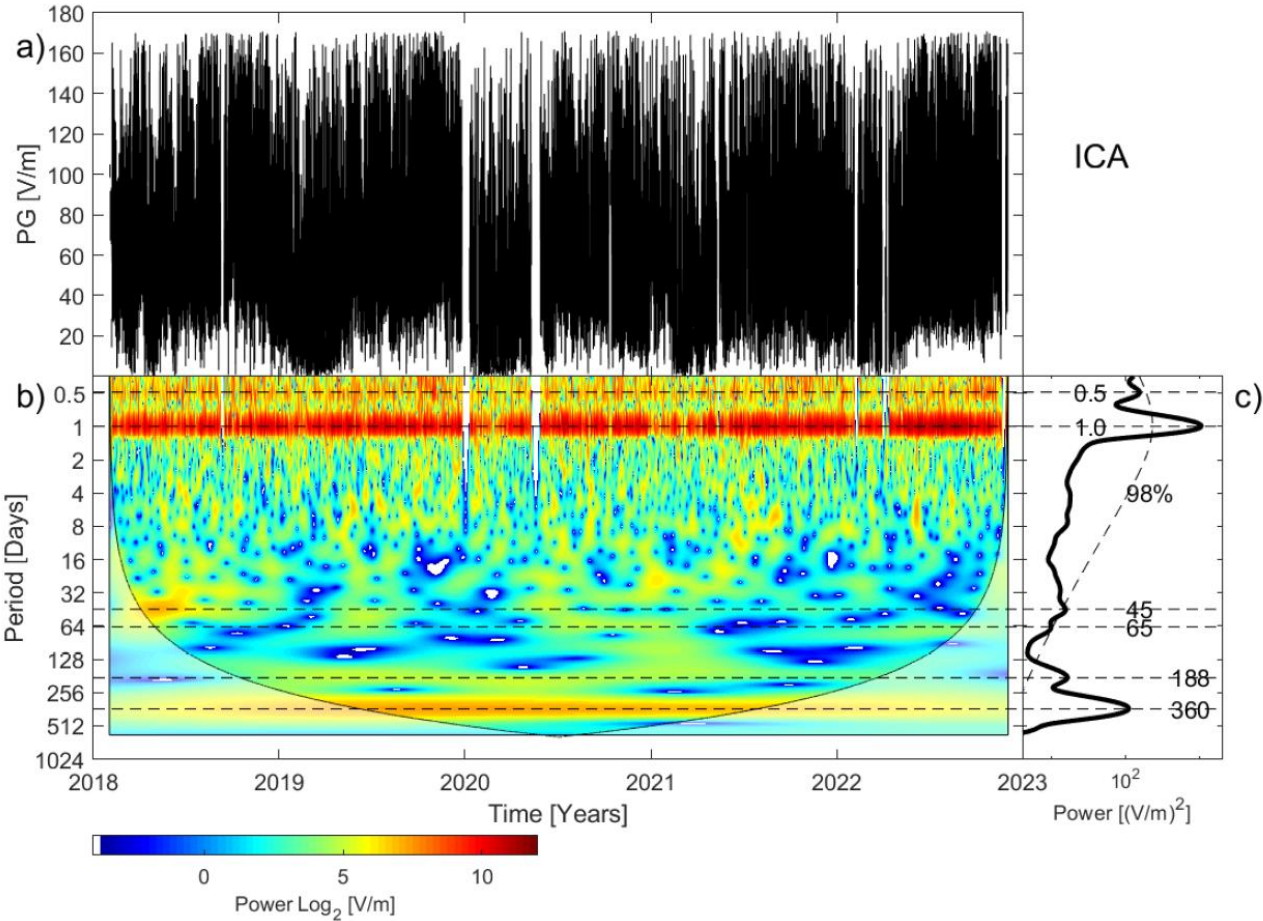


Figura 19. Análisis wavelet para la estación de Ica. (a) Promedio horario de la amplitud del PG en el rango de 0 a 170 V/m. Los vacíos indican datos faltantes. (b) Contornos que representan la parte real del espectro de potencia wavelet del PG en el dominio tiempo–período. Los colores indican la magnitud mínima y máxima, de azul a rojo. Las áreas blancas laterales corresponden al cono de influencia. (c) Espectro global de potencia wavelet, que resume la distribución de potencia en las distintas escalas temporales. Las líneas horizontales indican las oscilaciones más significativas, mientras que la curva discontinua representa el nivel de confianza del 98%.

4. Resumen y conclusiones

En resumen, este estudio investigó los factores que influyen en el gradiente de potencial (PG) en Ica, ciudad ubicada en la región desértica costera del sur del Perú. El análisis evidenció que las condiciones meteorológicas locales desempeñan un papel determinante en la variabilidad del PG. Los eventos de precipitación en Ica, generalmente de baja intensidad y carácter esporádico, generan variaciones significativas en el PG, motivo por el cual los días lluviosos fueron excluidos de la construcción de la curva estándar. Los vientos intensos característicos de la región, influenciados por la topografía local y la brisa marina, mostraron un impacto claro en la variación diurna del PG. Diferentes direcciones del viento produjeron incrementos o disminuciones del PG debido al transporte de aerosoles desde distintas fuentes, ocasionalmente generando tormentas de polvo conocidas como “Vientos Paracas” (Quijano, 2013). Se identificó un umbral de 3.5 m/s para evitar la influencia de la brisa marina y el levantamiento de polvo, fenómenos que provocan incrementos significativos del PG durante varias horas, en concordancia con lo reportado por Nicoll et al. (2022) en zonas áridas. Sin embargo, durante eventos de brisa marina en Ica no se observó reducción de visibilidad; por lo tanto, se requieren estudios más detallados y equipamiento adicional para comprender mejor este fenómeno. Asimismo, la proximidad del Anticiclón del Pacífico Sur a la costa, especialmente durante la primavera, modula estos patrones de viento, lo que se refleja en una mayor dispersión del PG en esta estación.

Se encontraron efectos del PG asociados a tormentas de polvo Paracas similares a los reportados en otras regiones del mundo (Rudge, 1913; Demon et al., 1953; Renno et al., 2004). Además, el origen de estos vientos coincide con las fuentes de polvo identificadas en Ica por Briceño-Zuluaga et al. (2017), tanto mediante el modelo HYSPLIT como a través de datos locales de dirección del viento. Es importante señalar que se observaron algunos casos de disminución del PG sin reducción visible de la visibilidad, algunos de los cuales precedieron a las tormentas Paracas. Esto puede atribuirse a la carga espacial generada por bajas concentraciones de polvo suspendido, fenómeno ampliamente documentado (Rudge, 1913; Kamra, 1972; Zhang et al., 2017). La capacidad de detectar variaciones del campo eléctrico antes de eventos de polvo ofrece una herramienta valiosa para la predicción y monitoreo de tormentas de polvo.

El impacto de los *dust devils* sobre el PG fue particularmente relevante. Se registraron tres eventos clave que mostraron aumentos transitorios del PG, indicativos de regiones con carga positiva dentro de estos vórtices, en concordancia con Lorenz et al. (2016). En contraste, cuando un *dust devil* pasó directamente sobre el sensor se observaron disminuciones del PG, probablemente debido al efecto de apantallamiento producido por polvo cargado negativamente, como lo describieron Freier (1960) y Farrell et al. (2004). El evento más significativo mostró un patrón complejo del PG, evidenciando la interacción detallada entre estos fenómenos y el campo eléctrico atmosférico.

Los eventos de niebla también demostraron influencia sobre el PG. La niebla densa produjo incrementos del PG en el 5% de los días con niebla, mientras que la niebla menos densa generó oscilaciones rápidas del PG en el 95% de los días con niebla y en casi el 40% de los días de invierno. El incremento del PG puede atribuirse a la disminución de la conductividad eléctrica del aire, fenómeno ampliamente establecido en la literatura (Anisimov et al., 2005; Bennett y Harrison, 2009; Yair y Yaniv, 2023). Por otro lado, las fluctuaciones rápidas del PG probablemente están asociadas a variaciones en la altura de la base nubosa. Dado que las capas inferiores de las nubes presentan carga predominantemente negativa, cambios en su altura afectan significativamente el PG (Harrison et al., 2019). Este concepto también aplica a la niebla, considerada esencialmente como una nube estratiforme situada cerca del suelo (Lakra y Avishek, 2022). No obstante, esta interpretación requiere validación adicional, ya que actualmente no se dispone de mediciones precisas mediante ceilómetro.

El análisis de las curvas estándar mensuales, estacionales y anuales revela una influencia significativa de los aerosoles y de las concentraciones de PM_{2.5} en la variación del PG. Asimismo, las estaciones de PG en Lima y Huancayo presentan una variación estacional similar a la observada en Ica (Tacza et al., 2020). La variación estacional del PG probablemente esté impulsada por diferencias en las concentraciones de aerosoles entre estaciones, principalmente asociadas a la quema de biomasa documentada en el Perú entre julio y octubre (Estevan et al., 2019). Sin embargo, esta hipótesis sigue siendo especulativa debido a la ausencia de mediciones in situ de aerosoles en Ica. Considerando este contexto, dichas actividades contribuirían significativamente a las diferencias estacionales observadas, generando una marcada variación en la amplitud del PG entre verano e invierno.

Es importante destacar que los efectos locales asociados a procesos convectivos en la variación diurna del PG ocurren de manera sistemática cada día y, por lo tanto, quedan reflejados en las curvas estándar mensuales, estacionales y anuales. Al comparar los valores de PG registrados durante un fenómeno específico con la curva estándar correspondiente, es posible identificar perturbaciones diarias asociadas a fenómenos geofísicos externos.

El análisis wavelet realizado con amplitudes horarias del PG permitió identificar oscilaciones de corto plazo y sus frecuencias significativas, aportando información relevante sobre la dinámica del PG en Ica. Se observaron periodicidades significativas de 1 día, 188 días y 360 días, correspondientes a las variaciones diurna, semianual y anual. La periodicidad de 45 días probablemente está asociada a la Oscilación Madden-Julian, más intensa entre enero y marzo de 2018, fenómeno también identificado en

744 otras estaciones de PG a nivel mundial, lo que sugiere la presencia de efectos globales observables en
745 Ica. Si bien este estudio aporta información valiosa sobre la relación entre el PG y factores
746 meteorológicos, también pone de manifiesto la necesidad de investigaciones adicionales. Entre los
747 aspectos prioritarios se encuentran el estudio detallado de la brisa marina y las tormentas de polvo
748 mediante equipamiento adicional (por ejemplo, ceilómetro), la validación de la relación entre niebla y
749 PG con instrumentación específica y la realización de mediciones in situ de aerosoles. Abordar estas
750 líneas de investigación permitirá profundizar en la comprensión de la interacción entre condiciones
751 meteorológicas y el PG en regiones áridas, contribuyendo de manera significativa al avance del
752 conocimiento en este campo.

753

754 **Agradecimientos**

755

756 Los autores agradecen a los dos revisores anónimos por sus valiosos comentarios que contribuyeron a
757 mejorar la calidad del artículo.

758

759 JPR agradece el financiamiento de CNPq (proyecto: 311927/2022-0) y CAPES (proyecto:
760 88881.310386/2018-01). RR expresa su gratitud a CNPq (Proc. 141576/2023-5 - GD).

761

762 **Disponibilidad de datos**

763

764 Los datos de PG de Ica están disponibles en la base de datos GloCAEM:
765 <http://data.ceda.ac.uk/badc/glocaem/data/>.

766

767 **Referencias**

768

769 Afreen, S., Victor, N.J., Nazir, S. et al. Fair-weather atmospheric electric field measurements at
770 Gulmarg, India. *J Earth Syst Sci* 131, 7 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12040-021-01745-5>

771

772 Anisimov, S.V., Galichenko, S.V., Aphinogenov, K.V., Prokhorchuk, A.A., 2018. Evaluation of the
773 atmospheric boundary-layer electrical variability. *Bound.-Layer Meteorol.* 167 (2), 327–348.

774

775 American Meteorological Society, 2023: Fog. Glossary of Meteorology,
776 <http://glossary.ametsoc.org/wiki/fog>.

777

778 Anisimov, S., Mareev, E.A., Shikhova, N.M., Sorokin, A.E., Dmitriev, E.M., 2005. On the electro-
779 dynamical characteristics of the fog. *Atmospheric Research.* 76. 16-28.
780 10.1016/j.atmosres.2004.11.026.

781

782 Bagnold, R.A., 2012. *The Physics of Blown And Desert Dunes*. Courier Corporation

783

784 Barrett, B. S. (2019). Connections between the Madden-Julian Oscillation and surface temperatures in
785 winter 2018 over eastern North America. *Atmospheric Science Letters*, 20(1), e869.

786

787 Bennett A.J., Harrison R.G., 2007. Atmospheric electricity in different weather conditions. *Weather –*
788 *October 2007, Vol. 62, No. 10*

789

790 Bennett A.J., Harrison R.G., 2009. Evidence for global circuit current flow through water droplet
791 layers, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 71, Issue 12, 2009, Pages 1219-
792 1221, ISSN 1364-6826,

793

794 Bo, T.-L., Zheng, X.-J., 2013. A field observational study of electrification within a dust storm in
795 Minqin, China, *Aeolian Res.*, 8, 39–47.

796
797 Briceño-Zuluaga F., Castagna, A., Rutllant, J., Aqueveque, V., Caquineau, S., Sifeddine, A., Velazco,
798 F., Gutiérrez, D., Cardich, J., 2017. Paracas dust storms: Sources, trajectories and associated
799 meteorological conditions. *Atmospheric Environment*. 165. 10.1016/j.atmosenv.2017.06.019.
800
801 Correa, D., Chamorro, A., Tam, J., 2020. Clasificación pentadal de vientos frente a la costa peruana.
802 *Revista de Investigación de Física*, 23(3), 61–65.
803
804 Crozier, W.D., 1964. The Electric field of New Mexico dust devil. *J. Geophys. Res.* 69, 5427–5429.
805
806 Crozier, W.D., 1970. Dust devil properties. *J. Geophys. Res.* 75, 4583–4585
807
808 Davila, C., Cubas Saucedo, F., Laura, W., Ita Vargas, T., Porras, P., Castro, A., Trebejo, I., Urbiola, J.,
809 Avalos, G., Villena, D., Valdez, M., Rodríguez Zimmermann, D., Menis, L., 2021. Atlas de
810 temperaturas del aire y precipitación del Perú. SENAMHI.
811
812 Demon, L., Defelice. P., Gondet, H., Kast, Y. and Pontier, L., 1953. Premiers résultats obtenus au
813 cours du printemps 1953, *J. Rech. C. N. R. S.*, 24, 126.
814
815 Dewitte, B., Illig, S., Renault, L., Goubanova, K., Takahashi, K., 2011. Modes of covariability
816 between sea surface temperature and wind stress intraseasonal anomalies along the coast of Peru from
817 satellite observations (2000-2008). *JGR*, vol 116. doi:10.1029/2010JC006495
818
819 Duff, N., and Lacks, D.J., 2008. Particle dynamics simulations of triboelectric charging in granular
820 insulator systems, *J. Electrostat.*, 66, 51.
821
822 Esposito, F., Molinaro, R., Popa, C.I., Molfese, C., Cozzolino, F., Marty, L., Taj-Eddine, K., Di
823 Achille, G., Franzese, G., Silvestro, S., Ori, G.G., 2016. The role of the atmospheric electric field in
824 the dust-lifting process. *Geophys. Res. Lett.* 43, 5501–5508.
825
826 Estevan, R., Martínez-Castro, D., Suarez-Salas, L., Moya, A., Silva, Y., 2019. First two and a half
827 years of aerosol measurements with an AERONET sunphotometer at the Huancayo Observatory, Peru,
828 *Atmospheric Environment: X*, Volume 3, 2019, 100037, ISSN 2590-1621.
829
830 Farrell, W.M., Smith, P.H., Delory, G.T., 2004. Electric and magnetic signatures of dust devils from
831 the 2000–2001 MATADOR desert tests. *J. Geophys. Res.* 109, E03004.
832
833 Franzese, G., Esposito, F., Lorenz, R., Silvestro, S., Popa, C.I., Molinaro, R., Cozzolino, F., Molfese,
834 C., Marty, L., Deniskina, N., 2018. Electric properties of dust devils. *Earth Planet. Sci. Lett.* 493, 71–
835 81.
836
837 Freier, G.D., 1960. The electric field of a large dust devil. *J. Geophys. Res.* 65, 3504.
838
839 Gay, S.P., 2005. Blowing sand and surface winds in the Pisco to Chala Area, Southern Peru. *Journal of*
840 *Arid Environments* 61. 101–117.
841
842 Grinsted, A., Moore, J.C., Jevrejeva, S., 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet
843 coherence to geophysical time series. *Nonlinear Process. Geophys.* 11, 561–566.
844
845 Gurmani, S.F., Ahmad, N., Tacza, J., Iqbal, T., 2018. First seasonal and annual variations of
846 atmospheric electric field at a subtropical station in Islamabad, Pakistan. *Journal of Atmospheric and*
847 *Solar-Terrestrial Physics*, 179, 441–449.

- Haldoupis, C., Rycroft, M., Williams, E., Price, C., 2017. Is the “Earth-ionosphere capacitor” a valid component in the atmospheric electric circuit? *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 164, 127–131.
- Haney, E.M., Grolier, M.J., 1991. Geologic map of major quaternary eolian features, northern and central coastal Peru. U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigation I-2162.
- Harrison R.G., 2011. Fair weather atmospheric electricity. *J. Phys.: Conf. Ser.* 301 012001
- Harrison, R.G., 2013. The Carnegie Curve. *Surveys in Geophysics*, 34, 209–232.
- Harrison, R. G., Nicoll K. A. and Aplin K. L., 2017. Evaluating stratiform cloud base charge remotely, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 6407–6412, doi:10.1002/2017GL073128.
- Harrison, R.G., Marlton G.J., Aplin K.L., Nicoll K.A., 2019. Shear-induced electrical changes in the base of thin layer-cloud. *Q J R Meteorol Soc.* 2019;145:3667–3679
- Imyanitov, I.M., 1957. *Pribory i metody dlya izucheniya elektrichestva atmosfery (Devices and Methods for Study of Electricity of Atmosphere)*, Moscow: Gostekhizdat, 1957, pp. 189–193
- Kamra, A. K., 1972. Measurements of the electrical properties of dust storms, *J. Geophys. Res.*, 30, 5856–5869.
- Karagioras A. and Kourtidis K., 2021. A Study of the Effects of Rain, Snow and Hail on the Atmospheric Electric Field near Ground. *Atmosphere* 2021, 12, 996.
- Kozlov, A.V.; Slyunyaev, N.N.; Ilin, N.V.; Sarafanov, F.G.; Frank-Kamenetsky, A.V. The Effect of the Madden–Julian Oscillation on the Global Electric Circuit. *Atmos. Res.* 2023, 284, 106585.
- Lakra, K., Avishek, K., 2022. A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali* (2022) 33:319–353.
- Li, L., Chen, T., Song, J., Ti, S., Wang, S., Cai, C., Li, W., Luo, J., 2023. Comparison of the Atmospheric Electric Field from Three Global Stations in 2021. *Universe* 2023, 9, 112
- Liu, C., Williams, E., Zipser, E.J., Burns, G., 2010. Diurnal variations of global thunderstorms and electrified shower clouds and their contribution to the global electric circuit. *J. Atmos. Sci.* 67 (2), 309–323.
- Liu, Y., San Liang, X., Weisberg, R.H., 2007. Rectification of the Bias in the Wavelet Power Spectrum. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 24 (12), 2093–2102.
- Lorenz, R.D., Neakrase, L.D.V., Anderson, J.P., Harrison, R.G., Nicoll, K.A., 2016. Point discharge current measurements beneath dust devils. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 150 55–60.
- MacGorman, D.R., Rust, W.D., 1998. *The Electrical Nature of Storms*. Oxford University Press 0-19-507337-1 (423 pp.)
- Macotela, E. L., Clilverd, M., Manninen, J., Moffat-Griffin, T., Newnham, D. A., Raita, T., Rodger, C.J., 2019. D-region high-latitude forcing factors. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 124 (1), 765–781.

900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951

Mkrtchyan, H., Karapetyan, G., & Aslanyan, D. (2020). Atmospheric electric field variations during fair weather and thunderstorms at different altitudes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 211, 105452. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105452>

Nicoll, K.A., Harrison, R.G., Barta, V., Bor, J., Brugge, R., Chillingarian, A., Chum, J., Georgoulas, A.K., Guha, A., Kourtidis, K., Kubicki, M., Mareev, E., Matthews, J., Mkrtchyan, H., Odzimek, A., Raulin, J.-P., Robert, D., Silva, H.G., Tacza, J., Yair, Y., Yaniv, R., 2019. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 184, 18–29.

Nicoll, K.A., Readle, A., Al Kamali, A., Harrison, R.G., 2022. Surface atmospheric electric field variability at a desert site, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 241, 2022, 105977, ISSN 1364-6826.

Quijano, J., 2013. Estudio numérico y observacional de la dinámica de viento paracas, asociado al transporte eólico hacia el océano frente a la costa de Ica - Perú. (Master's thesis, UPCH).

Rennó, N.O., Abreu, V.J., Koch, J., Smith, P.H., Hartogensis, O.K., De Bruin, H.A., Burose, D., Delory, G.T., Farrell, W.M., Watts, C.J. and Garatuza, J., 2004. MATADOR 2002: a pilot field experiment on convective plumes and dust devils. *J. Geophys. Res.*, 109(E7). E07001, doi:<https://doi.org/10.1029/2003JE002219>, 2004.

Rudge, W.A.D., 1913. Atmospheric electrification during South African dust storms, *Nature*, 91, 31–32.

Rycroft, M.J., Israelsson, S., Price, C., 2000. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62: 1563–1576.

Rycroft, M.J., Harrison, R.G., Nicoll, K.A., Mareev, E.A., 2008. An Overview of Earth's Global Electric Circuit and Atmospheric Conductivity. *Space Sci Rev* 137, 83–105.

Secker, P.E., 1975. The design of simple instrumentation for measurement of charge on insulating surfaces. *J. Electrostat.* 1 (1), 27–36.

Tacza, J., Raulin, J.-P., Macotela, E., Marun, A., Fernandez, G., Bertoni, F., Lima, L., Samanes, J., Buleje, Y., Correia, E., Alves, G., Makita, K., 2020. Local and global effects on the diurnal variation of the atmospheric electric field in South America by comparison with the Carnegie curve. *Atmospheric Research*, 240, 104938.

Tacza J., Nicoll, K.A., Macotela, E.L., Kubicki, M., Odzimek, A., Manninen, J., 2021. Measuring Global Signals in the Potential Gradient at High Latitude Sites. *Front. Earth Sci.* 8:614639.

Tacza J., Nicoll, K.A., Macotela E., 2022. Periodicities in fair weather potential gradient data from multiple stations at different latitudes, *Atmospheric Research*, Volume 276, 2022, 106250, ISSN 0169-8095.

Torrence, C., Compo, G., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of American Meteorological Society* 79, 61–78.

Torreson OW, Parkinson WC, Gish OH, Wait GR (1946) Ocean atmospheric-electric results (Scientific Results of Cruise VII of the Carnegie during 1928–1929 under command of Captain J. P.

952 Ault, vol 3). Researches of the Department of Terrestrial Magnetism. Carnegie Institution of
953 Washington Publication, vol 568
954
955 Telang, A.V.R., 1930. The influence of rain on the atmospheric-electric field. Terrestrial Magnetism
956 and Atmospheric Electricity. Vol. 35, Issue 3, 125-131.
957
958 Velazquez, Y., Nicora, G., Galligani, V., Wolfram, E., Salio, P., D’Elia, R., 2024. Exploring the global
959 thunderstorm influence on the fair weather electric field in Buenos Aires. Atmospheric Research, 299,
960 107182, 2024.
961
962 Williams, E., Nathou, N., Hicks, E., Pontikis, C., Russell, B., Miller, M., Bartholomew, M.J., 2008.
963 The electrification of dust-lofting gust fronts (‘haboobs’) in the Sahel, Atmospheric Research, Volume
964 91, Issues 2–4, 2009, Pages 292-298, ISSN 0169-8095,
965
966 Yair, Y., Yaniv, R., 2023. The Effects of Fog on the Atmospheric Electrical Field Close to the Surface.
967 Atmosphere 2023, 14, 549.
968
969 Yaniv R, Yair Y, Price C, Mkrtchyan H, Lynn B, Reymers A (2017) Ground-based measurements of
970 the vertical E-field in mountainous regions and the “Austausch” effect. Atmos Res 189:127–133.
971
972 Zhang, H., Bo, T-L., Zheng, X., 2017. Evaluation of the electrical properties of dust storms by multi-
973 parameter observations and theoretical calculations, Earth and Planetary Science Letters, Volume 461,
974 2017, Pages 141-150, ISSN 0012-821X.
975

976 La presente versión corresponde a una traducción automática al español del manuscrito original en
977 inglés. Aunque se ha procurado mantener la mayor fidelidad técnica posible, para citas formales,
978 interpretación precisa de resultados y uso académico oficial, se recomienda consultar directamente el
979 artículo original publicado en Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics (2024), DOI:
980 10.1016/j.jastp.2024.106198.
981