

**EFFECTO DEL ECLIPSE SOLAR DE DICIEMBRE DE 2020 EN LA
EVOLUCIÓN DE LA BRISA EN UN VALLE ANDINO**

**María Gassmann^{1,2}, Mauro Covi¹, Rodrigo Merino¹, Natalia Tonti¹, Lucía Curto^{1,2} y
Claudio Pérez^{1,2}**

¹**Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA.**

²**Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET**

Autor correspondiente: María Gassmann, gassmann@at.fcen.uba.ar

Manuscrito recibido el 9 de febrero de 2021, en su versión final el 7 de julio de 2021

RESUMEN

Este artículo muestra el impacto de un eclipse en las variables meteorológicas observadas por una estación de altura bajo un contexto observacional de brisa valle-montaña en la zona del valle inferior del río Manso, Río Negro. El 14 de diciembre de 2020 la luna ocultó entre el 90 y 100 del disco solar sobre Patagonia Norte. Al cumplirse exactamente un año de su instalación, la estación meteorológica Los Notros, ubicada en la ladera norte del cordón montañoso que acompaña al río, registró la evolución de la temperatura y humedad del aire, la velocidad y dirección del viento y la radiación global durante el eclipse. Particularmente, como la estación meteorológica fue instalada para estudiar la brisa de valle-montaña, se discute en este artículo las condiciones que permiten el desarrollo de la brisa en el valle, y el efecto que tuvo el eclipse en la circulación sobre la ladera.

Palabras clave: Brisa valle-montaña, Río Negro, Los Notros.

EFFECT OF THE DECEMBER 2020 SOLAR ECLIPSE ON THE ANDINE VALLEY BREEZE EVOLUTION

ABSTRACT

This short communication shows the impact of a solar eclipse on the meteorological variables observed by a high-altitude station that studies the valley-mountain breeze in the lower basin of the Manso River, Río Negro province. On December 14, 2020, the moon hid between 90 and 100 % of the sun over Northern Patagonia. One year after its installation, the “Los Notros” meteorological station, located on the northern slope of the river valley, recorded the evolution of air temperature and humidity, wind speed and direction, and global radiation during the eclipse. The conditions that allow the development of the breeze in the valley are discussed, as well as the effect that the eclipse had on the circulation on the slope.

Key Words: Valley-mountain breeze, Río Negro, Los Notros.

1) INTRODUCCIÓN

Las circulaciones locales en valles y montañas transportan propiedades como calor sensible, humedad y material particulado al interior del valle (Kuwagata y Kimura, 1995). De acuerdo con Whiteman y Doran (1993) se identifican cuatro mecanismos para describir los regímenes de viento en valles: los de origen térmico, el producido por la canalización forzada a través del valle, el dominado por mecanismos del campo de presión (Eckman, 1998) y los generados por transporte vertical turbulento de cantidad de movimiento. Acorde a las interacciones producidas entre el flujo de aire, los intercambios energéticos y la geomorfología del valle se pueden desarrollar brisas, pudiéndose encontrar patrones de viraje variable en la dirección del viento según el lugar (Palomaki y otros, 2019). La capa límite diurna que se desarrolla como consecuencia de mecanismos térmicos, se puede

Artículo en edición

subdividir en dos regiones (Ku wagata y Kimura, 1995). Una baja, con características de capa mezclada por la turbulencia convectiva, que puede alcanzar según las características del lugar, entre 500 y 1000 m de espesor, y contiene a los ascensos a través de las laderas. La segunda, más elevada, involucra a la subsidencia dentro del valle asociada a la rama de retorno de la circulación local, produciendo el transporte de aire y propiedades desde altura hacia el valle nuevamente. Sin embargo, los mecanismos que explican su evolución no se asemejan a los observados en planicies (De Wekker y Kossmann, 2015), habiendo allí una importante área de vacancia en el conocimiento.

El 14 de diciembre de 2019 docentes del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires instalaron una estación meteorológica de altura, identificada como Los Notros, en las cercanías de Río Villegas, Río Negro. La información obtenida por esta estación de altura tiene como objetivo estudiar la dinámica y variabilidad de la brisa de valle-montaña (Geiger y otros, 2003) como motor para el transporte, dispersión y depósito del polen anemófilo (Friedman y Barrett, 2009) de la flora autóctona ubicada en distintos pisos altitudinales del valle (Markgraf, 1980). El fenómeno de circulación local de valle-montaña ha sido estudiado por diversos autores (Ku wagata y Kimura, 1995, 1997; Resmi y otros, 2019), mientras que los efectos de un eclipse total o parcial sobre esta circulación ha sido estudiado relativamente poco (Palomaki y otros, 2019). La ocurrencia de una franja de eclipse solar total, 200 km al norte de dicha estación (NASA, 2020, <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEgoogle/SEgoogle2001/SE2020Dec14Tgoogle.html>, último acceso 30/05/2021), permitió analizar el impacto de este proceso tan particular sobre las variables meteorológicas medidas. Este trabajo tiene como objetivo mostrar un análisis del comportamiento de las variables meteorológicas y la evolución de la brisa durante el eclipse solar del 14 de diciembre de 2020 en una configuración de mediciones de valle-montaña.

2) LA BRISA DE VALLE-MONTAÑA

Artículo en edición

La estación Los Notros se ubica a 1154 m de altura sobre el nivel del mar (msnm) (41,6°S 71,5°O) en el límite inferior del bosque de lengas (*Nothofagus pumilio*) en la ladera norte del valle del río Manso inferior (Pcia. Rio Negro, Argentina), cuya orientación es O-E. La estación se ubica en el cordón montañoso a la izquierda del río, que desagua en el Océano Pacífico, en la ladera norte. Se trata de un valle profundo con una altura promedio en el paso de 350 msnm rodeado de cerros de una altura media de 1600 msnm (Madariaga, 2019). Los Notros registra temperatura y humedad relativa del aire (Vaisala HMP155A), la dirección y velocidad del viento (Gill 2D Windsonic4), el mojado de la superficie (sensor tipo Arduino) y la radiación global (CNEA) con una resolución temporal de almacenamiento de 15 min (CR300 Campbell Sci Inc). Además, es la primera estación meteorológica del DCAO que transmite sus datos (TX321 Campbell Sci Inc) utilizando el satélite GOES Este (75°O) ubicado al oeste de la Argentina, lo que permite realizar un seguimiento del estado de operatividad de la estación y adquirir las mediciones en tiempo real.

La brisa de valle-montaña es un fenómeno local de circulación de aire que se desarrolla, en determinadas circunstancias se desarrolla como consecuencia del calentamiento de la superficie de la ladera y los gradientes horizontales de temperatura y presión que se generan respecto del aire en el centro del valle (Barry, 2008) (Figura 1). Al considerar una parcela de aire sobre la ladera de la montaña, el calentamiento diferencial en la superficie incrementa la fuerza de empuje (F_E) y modifica el sentido de la fuerza asociada al gradiente de presión (F_P). El aire menos denso sobre la superficie disminuye la presión de la parcela respecto del entorno (aire en el valle), generando una baja térmica, que induce un flujo ascendente sobre la ladera, tal como se indica en la Figura 1 (Día). Durante la noche, la superficie de la ladera se enfría más rápido que el aire del valle, modificando la temperatura del aire adyacente, lo que incrementa su densidad, generando un alta térmica sobre la ladera. Ello modifica el sentido de la fuerza de empuje y de gradiente de presión (Figura 1, Noche), resultando en un flujo descendente sobre la ladera. El balance de fuerzas que explica este proceso produce, para una ladera del hemisferio sur orientada hacia el norte, viento con componente N durante las horas diurnas (vientos anabáticos) y viento con

Artículo en edición

componente S en horas nocturnas (vientos catabáticos).

En días con cielos despejados, en el valle del río Manso la brisa de valle-montaña se desarrolla siguiendo el patrón descrito. El día 27 de febrero de 2020 tuvo características excepcionales para analizar este proceso en ese valle patagónico. Las condiciones meteorológicas de escala sinóptica analizadas a través de los campos de presión reducido a nivel del mar, viento en superficie y espesor 1000/500 hPa (datos de reanálisis de ERA5 (Hersbach y otros, 2020) a las 12 y 18 UTC (Figura 2) resultaron favorables para el desarrollo de circulaciones locales en la región. Dos anticiclones posicionados tanto al este como al oeste de la cordillera dieron lugar a la ocurrencia de vientos de escala sinóptica débiles en superficie y una lengua de aire caliente sobre la zona de medición. La subsidencia asociada a dichos sistemas sinópticos garantizó cielos despejados, con máxima insolación a lo largo de todo el día.

La salida de sol para esa fecha se produjo alrededor de las 7:24 h (hora local) y la puesta a las 20:34 h. La hora del cenit se produjo a las 13:59 h. Las mediciones de radiación global (R_g) (Figura 3a) indican que la insolación tiene un patrón anómalo en las primeras horas del día. Esto estaría asociado a un período de penumbra en la estación meteorológica, debido a que el sol tiene un ángulo de elevación tal que las montañas circundantes hacia el E producen sombra sobre el sitio de medición. Este fenómeno finalizó a las 9 h, cuando el sol alcanzó un ángulo de elevación de aproximadamente 17° . La penumbra también produjo un retraso en el inicio del aumento de la temperatura (T) luego del amanecer y en la disminución de la humedad relativa (HR) (Figura 3b). La temperatura se incrementó sostenidamente desde el amanecer hasta la hora de la máxima temperatura (17 a 18 h). La tasa máxima de calentamiento se observó a la hora que el sol alcanza el cenit y fue de 2.6°C h^{-1} . Luego de ese momento se desacelera el aumento de temperatura hasta que se alcanza el máximo de temperatura en superficie. El descenso de temperatura (aumento de humedad relativa) hacia el atardecer se produjo mucho más rápido que el de calentamiento, llegándose a encontrar tasas de enfriamiento de hasta $5,1^\circ\text{C h}^{-1}$. En horas de la madrugada hasta aproximadamente las 8:30 h del 27 de febrero, la dirección del viento (Dir) fue persistente desde el S (aproximadamente 170°) (Figura 3c). Entre las 8:30 y las 10 h se

Artículo en edición

produce una rotación del viento hacia el N (entre 350 a 360° y 0 a 15°) que se mantiene durante las horas diurnas, hasta que a las 18 h el viento comienza a virar nuevamente hacia el S, alcanzando esta dirección a las 20 h. Esta rotación indica el comienzo de vientos catabáticos responsables de advecciones frías visualizadas como un intenso descenso de temperatura en la estación entre las 18 y 20 h. La dirección S se mantiene hasta el final del día, aunque con mayor variabilidad a la observada durante la madrugada. Por otra parte, la intensidad del viento (V) tiene valores entre 1,2 y 1,5 ms^{-1} durante la noche y velocidades de hasta 2 ms^{-1} durante el día. La intensidad y dirección del viento son indicativas de un fenómeno local de circulación de aire. Es interesante observar que en los momentos de cambio de dirección la intensidad del viento disminuye hasta alcanzar valores de 0,5 ms^{-1} , similar a lo observado por Román-Cascón y otros (2019) en brisas de valles del hemisferio norte. El sondeo observado en la estación de Puerto Montt (Chile) muestra la presencia de del anticiclón con una inversión de temperatura ubicada aproximadamente a 300 m de altura para ese lugar (Figura 3 d).

3) EL ECLIPSE Y SU EFECTO EN LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS

Las condiciones meteorológicas imperantes el 14 de diciembre de 2020 fueron menos favorables para el desarrollo de brisas de origen térmico respecto de las observadas en la fecha descrita en la sección anterior. Una vaguada en superficie con centro en 50°S y ubicada sobre el Océano Atlántico, dio lugar al pasaje de un sistema de baja presión que produjo algunas lluvias y lloviznas hasta las 13 h en la estación Bariloche (SMN) ubicada unos 70 km al NE de Los Notros, dentro de la estepa patagónica. La dirección del viento registrado en esa estación fue del ONO a lo largo de todo el día con intensidades que oscilaron a la hora del eclipse entre 8,2 y 13,4 ms^{-1} . Durante la segunda mitad del eclipse, la presencia de nubosidad baja en la estación Bariloche fue variable (6 a 3 octavos). Los datos de reanálisis indican para la zona de la estación Los Notros vientos en superficie más intensos que los observados el 27 de febrero, con una dirección predominante del OSO y temperaturas bajas, como lo indican los campos de espesores observados en la Figura 4,

Artículo en edición

tanto a las 12 como a las 18 UTC.

El fenómeno celeste comenzó en el área de la estación Los Notros a las 11:45 h y culminó a las 14:33 h. El máximo oscurecimiento ocurrió a las 13:07 h y el ocultamiento del disco solar fue levemente mayor al 94%. Ese día amaneció a las 6:06 h. El sol alcanzó el cenit a las 13:42 h y la puesta fue a las 21:16 h. En comparación con la evolución de R_g observada el 27 de febrero, el 14 de diciembre muestra claros signos de la presencia de nubosidad en el área de la estación meteorológica, con disminuciones y aumentos erráticos a lo largo de la jornada, producto de las interferencias por nubosidad (Figura 5a). Sin embargo, es visible el efecto del eclipse en esta variable, que se redujo desde $927,0 \text{ Wm}^{-2}$ observado a las 11:15 hasta $28,5 \text{ Wm}^{-2}$ medido a las 13:00 h. Si bien la disminución en la intensidad de la radiación solar comenzó antes del eclipse debido a la presencia de nubes, el mínimo observado concuerda con el horario de máximo ocultamiento del sol. La temperatura y humedad relativa del aire mostraron signos de cambio a partir de las 12:00 h, con una disminución inicial de $0,5^\circ\text{C}$ (Figura 5b). De acuerdo con Girard-Ardhuin y otros (2003) la capa límite atmosférica presenta un retraso en la respuesta entre 15 y 30 min en respuesta a los efectos del eclipse, principalmente asociados al retraso en el flujo de calor sensible para adaptarse a las nuevas condiciones de la superficie. Otros autores (Román-Cascón y otros, 2019) encuentran un retraso aún mayor (de hasta 80 minutos) respecto de los cambios de signo en los flujos de calor sensible en superficie para los momentos de transición entre día-noche y viceversa en brisas de valle-montaña. La temperatura durante el eclipse disminuyó de 7°C a las 11:45 h a $4,9^\circ\text{C}$ a las 13:00 h, mientras que la humedad relativa primero disminuyó y luego aumentó. La temperatura recuperó un valor de 7°C recién a las 15:00 h, mostrando un retraso similar al observado durante el ocultamiento. Como surge de los campos sinópticos, los procesos de esa escala dominaron en la variabilidad observada en los parámetros medidos por la estación. Sin embargo, algunos cambios asociados al eclipse pudieron ser percibidos en todas las variables. En el caso del viento y su dirección, las condiciones meteorológicas dominantes generaron viento con componente OSO durante todo el día (Figura 4 a y b). A pesar de ello, el viento medido en la ladera del valle muestra un cambio de dirección sostenido desde el OSO hacia el ONO luego del amanecer (Figura

Artículo en edición

5c), volviendo a virar hacia el OSO al atardecer, con direcciones más variables en las primeras horas de la noche, similar a lo ocurrido durante el 27 de febrero. Estos cambios en las direcciones indican que, a pesar del dominio de las condiciones sinópticas sobre la región, se logró generar una circulación local dentro del valle, mostrando características de una brisa. Durante el eclipse, el viento rotó del ONO hacia el OSO, para luego rotar nuevamente hacia el ONO con la finalización del mismo. También se observó una disminución en su intensidad desde $4,9 \text{ ms}^{-1}$ hasta 2 ms^{-1} , siguiendo el patrón de cambio de dirección de viento cuando la superficie de la ladera se enfría y el flujo de aire desciende por tener mayor densidad que su entorno. El sondeo de Puerto Montt a las 12 UTC muestra condiciones saturadas desde superficie hasta unos 2500 m de altura y subsidencia en niveles superiores (Figura 5 d).

4) CONCLUSIONES

El eclipse solar produjo modificaciones en las variables meteorológicas observadas en la ladera norte de una montaña ubicada a $41,6^{\circ}\text{S}$. La temperatura descendió $2,1^{\circ}\text{C}$ entre el inicio del fenómeno y el máximo ocultamiento del sol. A pesar de condiciones sinópticas poco favorables para el desarrollo de circulaciones locales de brisa de origen térmico, el patrón de viento con componente N durante horas con insolación y luego con componente S en el período de oscurecimiento, siguió el ritmo asociado a los cambios de signo en el flujo de calor sensible debidos al fenómeno celeste, generando vientos anabáticos y catabáticos sobre la ladera de la montaña. Sin embargo, el comportamiento del viento dentro del valle a lo largo de ese día en particular, que también muestra indicios de circulaciones de brisa, abre la perspectiva de analizar, a partir de la base de datos generada por Los Notros, los diferentes mecanismos de generación de brisa dentro del valle acorde a lo identificado por Whiteman y Doran (1993).

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo se desarrolló con el financiamiento de la Agencia de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y de la Innovación a través del

Artículo en edición

proyecto PICT 2016-0592. Los autores agradecen a Oscar y Lisandro Lanfré por su colaboración en la instalación y resguardo de la estación meteorológica Los Notros. Los autores agradecen los comentarios de los revisores que sirvieron para mejorar este artículo.

REFERENCIAS

Barry, R., 2008: Mountain weather and climate. 3rd Edition. Cambridge University Press, 506 pp.

De Wekker, S.F.J. y Kossmann, M., 2015: Convective Boundary Layer Heights Over Mountainous Terrain. A Review of Concepts. *Front. Earth Sci.*, 3,77.

Eckman, R.M., 1998: Observations and numerical simulations of winds within a broad forested valley. *J. App. Meteo.*, 37, 206-219.

Friedman, J. y Barrett, S.C.H., 2009: Wind of change: new insights on the ecology and evolution of pollination and mating in wind-pollinated plants. *Ann. of Bot.*, 103, 1515-1527, doi: 10-1093/aob/mcp035.

Geiger, R., Aron, R.H. y Todhunter, P., 1995: The climate near the ground. 5th Edition. Vieweg, 528 pp.

Girard-Ardhuin, F., Bénech, B., Campistron, B., Dessens, J. y Jacoby-Koaly, S., 2003: Remote Sensing and surface observations of the response of the Atmospheric Boundary Layer to a Solar Eclipse, *Bound.-Layer Meteorol.*, 106, 93–115.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Muñoz-Sabater, J., y otros, 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146, 730, 1999-2049.

Artículo en edición

Kuwagata, T. y Kimura, F., 1995: Daytime Boundary Layer Evolution in a Deep Valley. Part I: Observations in the Ina Valley. *J. Appl. Meteorol.*, 34, 1082-1091.

Kuwagata, T. y Kimura, F., 1997: Daytime Boundary Layer Evolution in a Deep Valley. Part II: Numerical Simulation of the Cross-Valley Circulation. *J. Appl. Meteorol.*, 36, 883-895.

Madariaga, M.C., 2019: El Valle del Río Manso Inferior y su funcionamiento como sistema. Comunicación Técnica N° 250, Área Desarrollo Rural, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 67 pp.

Markgraf, V., 1980: Pollen Dispersal in a Mountain Area. *Grana*, 19, 2, 127-146, doi: 10.1080/00173138009424995.

Palomaki, R.T., Babić N., Duine G.J, van den Bossche M. y De Wekker S.F.J., 2019: Observations of Thermally-Driven Winds in a Small Valley during the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Atmosphere* 10, 389, 21 pp.

Resmi, E.A., Murugavel, P., Dinesh, G., Balaji, B., Leena, P.P., Mercy, V., y otros, 2019: Observed diurnal and intraseasonal variations in boundary layer winds over Ganges valley. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 188, 11-25.

Román-Cascón, C., Yagüe, C., Arrillaga, JA., Lotho, M., y otros, 2019: Comparing mountain breezes and their impacts on CO₂ mixing ratios at three contrasting areas. *Atmos. Res.*, 221, 111-126.

Whiteman, C.D. y Doran, J.C., 1993: The Relationship between Overlying Synoptic-Scale Flows and Winds within a Valley. *J. Appl. Meteorol.* 32, 1669-1682.

Artículo en edición

Figuras y Tablas

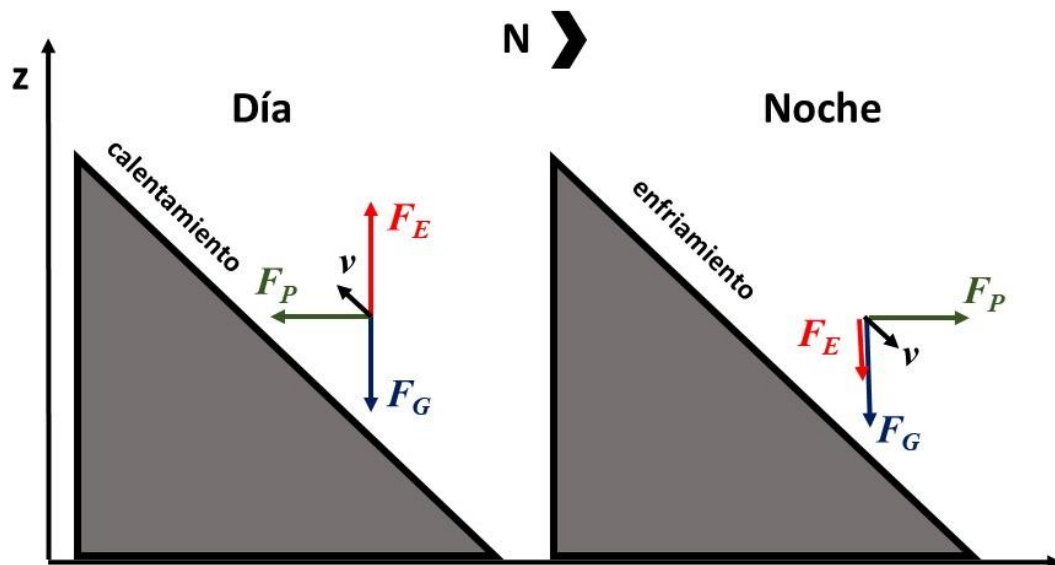


Figura 1: Esquema de fuerzas actuantes durante la brisa de valle-montaña con (izquierda) y sin (derecha) insolación: fuerza de empuje (F_E), fuerza de gravedad (F_G), fuerza de gradiente de presión (F_P) y vector viento (v)

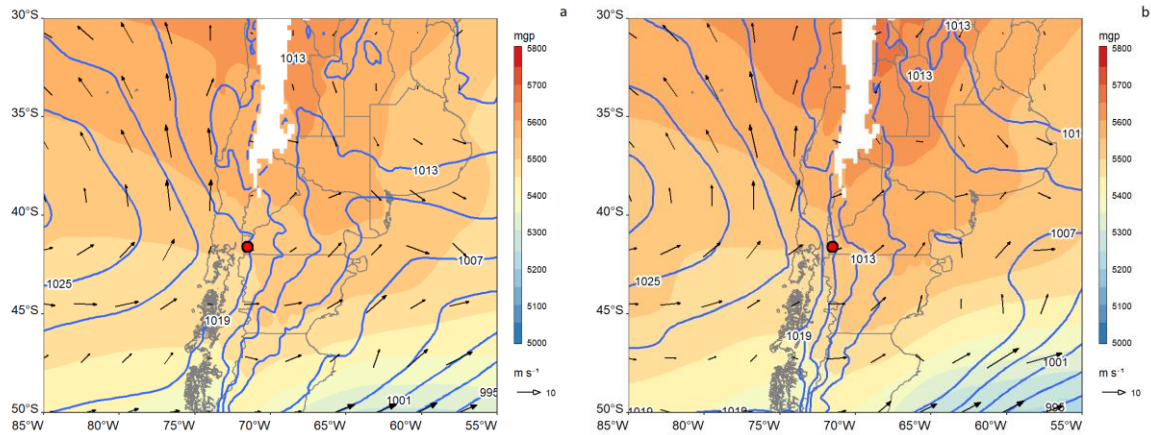


Figura 2: Campos de presión en superficie (líneas llenas azules) (hPa), velocidad de viento en superficie (ms-1) y espesor 1000/500 (barra de colores) (m) correspondientes al día 27 de febrero de 2020 a las 12 UTC (a) y a las 18 UTC (b). Datos de reanálisis ERA5

Artículo en edición

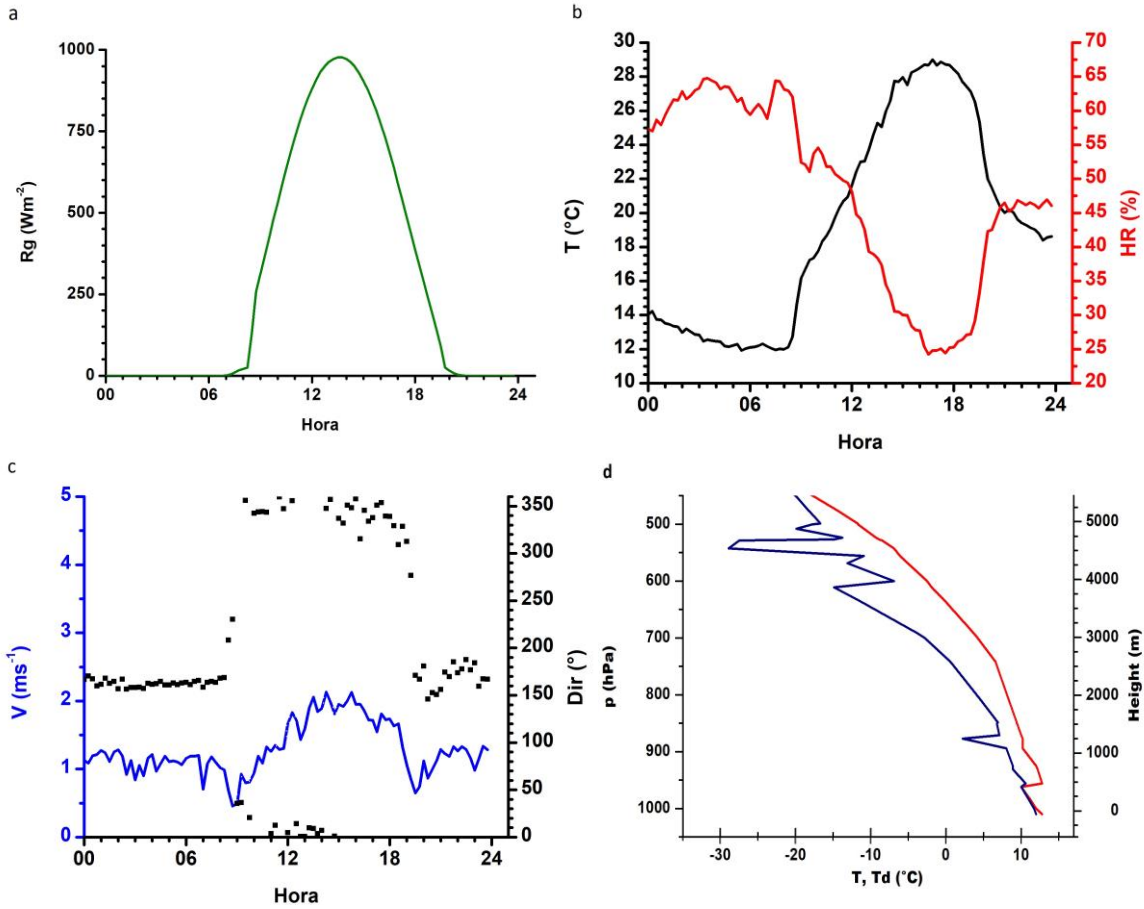


Figura 3: Mediciones cada 15 minutos en la estación Los Notros de radiación global (R_g), temperatura (T), humedad relativa (HR), velocidad (V) y dirección del viento (Dir) el 27 de febrero de 2020. Hora local argentina (GMT-3). d) Sondeo 12 UTC en Puerto Montt (Chile)

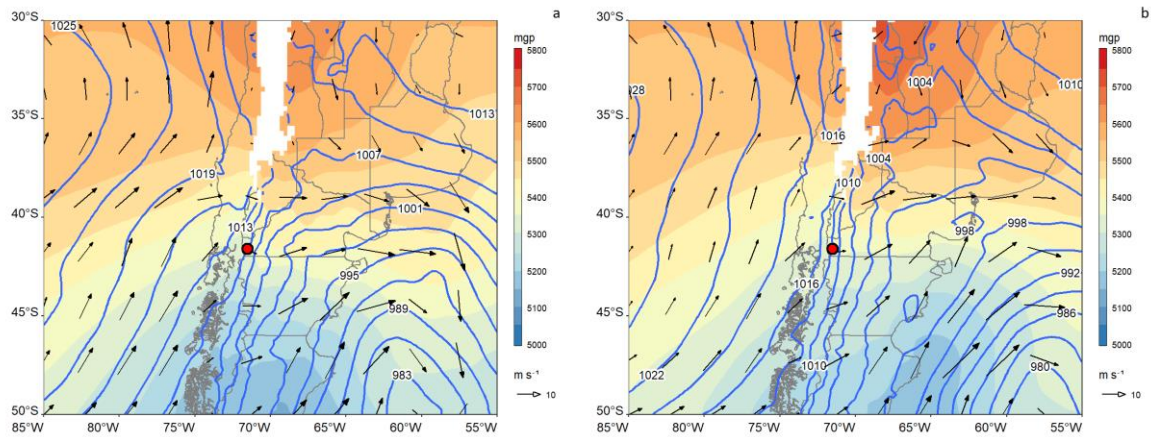


Figura 4: Campos de presión en superficie (líneas llenas azules) (hPa), velocidad de viento en superficie (ms^{-1}) y espesor 1000/500 (barra de colores) (mgp) correspondientes al día 14 de diciembre de 2020 a las 12 UTC (a) y a las 18 UTC (b). Datos de reanálisis ERA5

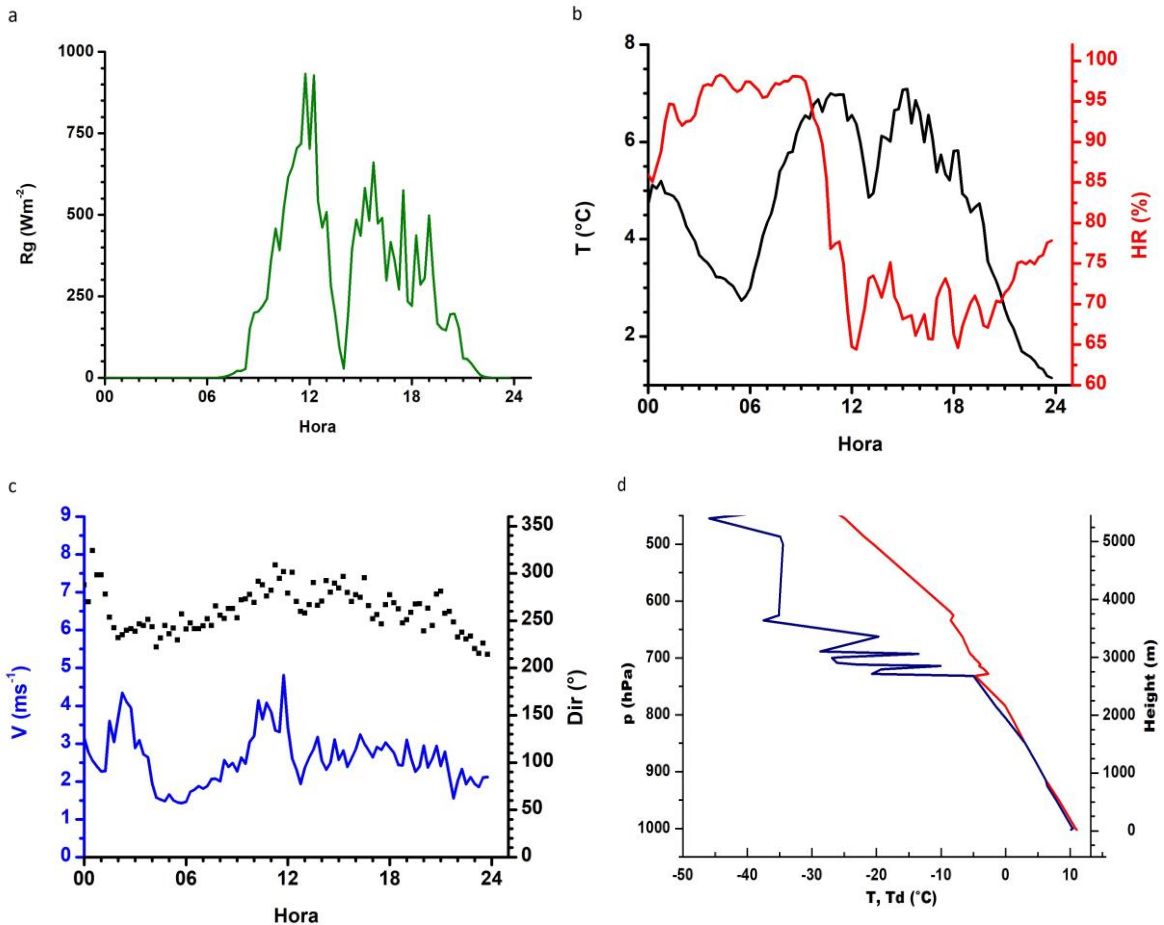


Figura 5: Mediciones cada 15 minutos del 14 de diciembre de 2020 en la estación Los Notros de: a) radiación global (R_g), b) temperatura (T) y humedad relativa (HR), c) velocidad (V) y dirección del viento (Dir). Hora local argentina (GMT-3). d) Sondeo 12 UTC en Puerto Montt (Chile)