

MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN Y CLIMATOLOGÍA DEL VIENTO ZONDA EN SAN JUAN

CLASSIFICATION METHODS AND STATISTIC OF ZONDA WIND IN SAN JUANCITY

Federico Otero¹, Federico A. Norte¹

¹ Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Centro Regional de Investigaciones Científicas y Técnicas/CONICET.
Av. Ruiz Leal s/n., Parque Gral. San Martín, (5500) Mendoza, Argentina.
E-mail: fotero@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Este trabajo se propone evaluar distintos Métodos de Clasificación Objetiva (MCO) de eventos de viento zonda (foehn) y actualizar la estadística disponible de dicho fenómeno en la ciudad de San Juan. En primer lugar, se realizó una clasificación del viento zonda siguiendo el método de los tres puntos, donde se analizan los cambios temporales en la dirección e intensidad del viento, en la temperatura y temperatura de rocío, para diagnosticar la presencia de zonda. Esta clasificación se utilizó como referencia para evaluar la habilidad de clasificación de otros métodos objetivos, los cuales ayudan a entender cuáles son las variables más relevantes, proporcionando una base física para definir la ocurrencia de viento zonda en la estación. Siguiendo las metodologías de clasificación realizadas por otros autores se seleccionaron las variables más adecuadas, siendo éstas una combinación de la dirección y velocidad del viento y de las anomalías de temperatura y temperatura de rocío. Se proponen tres MCO; el método de la Temperatura Máxima (CTMAX), que incluye las variables de temperatura máxima del día, temperatura máxima media del mes y temperatura de punto de rocío mínima del mismo día; el método de Clasificación por Anomalías Diarias (CAD), que tiene como variables a las anomalías diarias de temperatura y de temperatura de rocío y el método de Clasificación por Anomalías Estacionales (CADE), con anomalías estacionales de temperatura y temperatura de rocío. Todos los métodos lograron identificar gran parte de los eventos de viento zonda en San Juan. Finalmente se realizó una climatología del viento zonda la cual se abordó con los resultados obtenidos por los distintos métodos propuestos. Se analizó el ciclo diurno y anual, la hora de inicio y finalización y la duración de los eventos.

Palabras Claves: Foehn, viento zonda, métodos de clasificación, diagnóstico de zonda, estadística.

ABSTRACT

This paper intends to evaluate different Objective Classification Methods (OCM) for zonda wind (foehn) events and update the statistics of this phenomenon in the city of San Juan. First, a classification was performed according to the "three point method", where analyze temporal changes in wind speed and direction, temperature and humidity to diagnose the presence of zonda. This classification was used as a reference for assessing the classification ability for other objective methods, which help us to understand the most important variables that provide a physical basis to define the Zonda wind occurrence at San Juan station. Following the classification methodologies by other authors, the most appropriate variables were selected, being a combination of the speed and direction of wind and temperature anomalies and relative humidity. Three OCM are proposed; The Maximum Temperature Method of the (MTM), including daily maximum temperature, monthly average maximum temperature and minimum dew point temperature for the same day variables; the Daily anomalies Method (DM), which has as variables the daily temperature and dew point temperature anomalies and finally, the Seasonal anomalies Method (SM), with seasonal temperature and dew point temperature anomalies. All methods were able to identify many of the Zonda wind events in San Juan. Finally, Zonda wind climatology where addressed for the different proposed methods, diurnal and annual cycle, onset, offset and the average duration of the events took place in this analysis.

Keywords: Foehn, zonda wind, Objective Classification Method diagnosis, statistics.

INTRODUCCIÓN

El zonda es un viento fuerte, cálido y muy seco asociado a una masa de aire que al descender por las laderas orientales de la Cordillera de los Andes se comprime adiabáticamente. Este evento ocurre con mayor frecuencia en las temporadas de invierno y primavera, principalmente en las provincias de Mendoza y San Juan (Norte, 1988). Las primeras investigaciones sobre este tipo de viento se realizaron en la región de los Alpes, donde se le conoce como viento "foehn". Este término se convirtió en el nombre genérico para todos los vientos cálidos y secos descendentes (Huschke, 1980) cuyas características y efectos dependen de la interacción entre el flujo atmosférico y la topografía como así también de las condiciones meteorológicas particulares. En regiones pobladas, se produce una serie de daños en función de la intensidad de las ráfagas de viento (por ejemplo, voladura de techos, caída de árboles y de líneas eléctricas de alta tensión, como así también la interrupción de los sistemas de comunicación). Además favorece la ignición y propagación de incendios y causa daños a los cultivos debido al fuerte viento, su repentina sequedad y las altas temperaturas. A grandes altitudes, en las montañas, su ocurrencia acelera el derretimiento y evaporación de la nieve modificando la profundidad de la capa de nieve, lo que contribuye a la posibilidad de avalanchas y cambio repentinos en el ciclo hidrológico.

Los métodos de clasificación se basan en una determinada selección de criterios que permiten diagnosticar la presencia o no de un determinado fenómeno. El método más utilizado para la detección de viento foehn a partir de datos observacionales, consiste en analizar los cambios temporales del viento, temperatura y humedad. Este método subjetivo fue denominado "método de los tres puntos" (Conrad, 1936; Osmond, 1941; Obenland, 1956), en el cual, el inicio de un evento de foehn se diagnostica cuando el cambio en la dirección del viento, hacia la dirección apropiada del viento foehn, que se corresponde con la orientación de la barrera orográfica, está acompañado por un aumento en la velocidad y rafagosidad, como así también por un aumento en la temperatura y una disminución de la humedad relativa. El final de un evento foehn se caracteriza por las condiciones opuestas. Este método de Clasificación Subjetivo (CS) se basa en una fenomenología en lugar de una descripción física del foehn.

Actualmente se utilizan Métodos de Clasificación Objetiva (MCO) para realizar diagnósticos del fenómeno. Esta clasificación se basa en criterios físicos significativos que tienen que ser cumplidos para clasificar un dato como foehn. El primer enfoque para automatizar el diagnóstico objetivo de viento foehn fue hecho por Gutermann (1970) quien, mediante un análisis discriminante de Fisher para cada mes, obtuvo las variables más adecuadas para dicha clasificación. Estas variables resultaron ser una combinación entre la dirección y velocidad del viento, de las anomalías (anuales y mensuales) de temperatura y humedad relativa. Se probaron muchas variables adicionales pero los resultados no mejoraron. Otro tipo de MCO fue desarrollado dentro del MAP (Mesoscale Alpine Program, 1999) por Vergeiner et al. (2004). Explora el hecho de que el viento foehn desciende corriente abajo de una cadena de montañosa conservando su temperatura potencial (por ejemplo, Smith 1985, Farmer y Armi, 2001, Armi y Farmer, 2002 Mayr et al., 2004), de manera que dicha temperatura en una estación meteorológica corriente abajo es al menos tan alta como la de una estación meteorológica en la cresta de la barrera. Aparte de la temperatura potencial, la dirección apropiada del viento y una velocidad mínima (típicamente $1-2 \text{ m s}^{-1}$) son necesarias, tanto en la cresta como en las estaciones del llano. Para la aplicación de este método es condición disponer de estaciones meteorológicas automáticas en la cresta del obstáculo y en el llano. El rango direccional se elige en función de los datos topográficos de la cresta, de forma tal que la dirección del viento presente una componente perpendicular a la barrera. Por lo general dicho rango puede estar cerca de los 180° .

Las clasificaciones objetivas resultan de gran utilidad para obtener fácilmente los eventos de foehn a fin de realizar estudios climatológicos. Estos métodos incorporan y evalúan, en función de los procesos físicos asociados, las variables más representativas para su diagnóstico. Si bien existen antecedentes acerca del estudio del viento zonda, son muy pocos aquellos autores que investigan en detalle o explican la forma y/o el método para diagnosticar un evento de viento zonda (entre ellos Norte, 1988), y en la mayoría de los casos han abordado episodios bien definidos y de características severas. Este trabajo propone evaluar las capacidades de diferentes métodos de clasificación objetiva de viento zonda, con el fin de obtener una primera aproximación a la detección automática de los eventos en función de las variables que mejor representan las características del fenómeno. Esto sería de gran utilidad para realizar estudios climatológicos del fenómeno en otras estaciones de la región. Se completa el estudio realizando una estadística de viento zonda para la ciudad de San Juan. Los resultados serán de interés para la toma de decisiones ante la posibilidad de su ocurrencia.

El estudio propuesto está organizado de la siguiente manera: la sección 2 describe los datos y metodologías utilizadas, la sección 3 presenta los resultados obtenidos de la aplicación de las diferentes metodologías enunciadas y los derivados de la climatología del fenómeno para la estación de superficie y finalmente en la sección 4 se muestran las conclusiones y la discusión.

DATOS Y METODOLOGÍAS

Datos

Para este trabajo se utilizó la serie de datos horarios de temperatura, temperatura de rocío, dirección y velocidad del viento y de la ráfaga máxima horaria de la estación meteorológica San Juan Aero (87311, 31°34'S; 68°30'O) perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ubicada a una altura de 598 msnm. El período de estudio abarca desde el 1 de julio de 1991, cuando comenzaron las mediciones horarias, hasta el 30 de junio de 2014. Además, se utilizaron los datos diarios de temperatura máxima, dirección y velocidad máxima diaria de la velocidad del viento de la estación mencionada.

Metodologías

Cálculo de Anomalías Diarias y Anomalías Estacionales

El cálculo de anomalías horarias (ec. 1), tanto de temperatura como de temperatura de rocío, se realizó considerando el ciclo medio anual a escala horaria. Es decir, se calcularon los promedios, con los 24 años (1991-2014), para cada día y hora del año. De este modo, se obtuvo luego la serie de anomalías para cada dato horario. La serie de las medias tiene un total de 8094 datos (un único dato para cada hora de cada día del año):

$$\bar{x}(i, j) = \frac{1}{24} \sum_{k=1}^{24} x(i, j, k) \rightarrow x' = x(i, j, k) - \bar{x}(i, j) \quad (1)$$

$$\text{para } i = 0 \dots 23, j = 1 \dots 365$$

Donde: $x(i, j, k)$ es el dato de la hora i , el día del año j y año k .

El cálculo de anomalías estacionales (ec. 2) de temperatura y temperatura de rocío, consistió en el cálculo del ciclo diario medio (24 horas) de cada una de las series temporales correspondientes a las cuatro estaciones del año (DEF, MAM, JJA y SON). Luego se calcularon las anomalías correspondientes para cada dato del total de la serie.

$$\bar{x}_{SON}(i) = \frac{1}{91 \cdot 24} \sum_{k=1}^{24} \sum_{l=1}^{91} x(i, l, k) \rightarrow x'_{SON}(i, l, k) = x(i, l, k) - \bar{x}_{SON}(i) \quad (2)$$

$$\text{para } i = 0..23, l = 1 \dots 91$$

Donde: l corresponde a los días de septiembre, octubre y noviembre. Donde $x(i, j, k)$ es el dato de la hora i , el día del año j (que se encuentra dentro de los meses de SON) y año k .

Métodos de Clasificación

Todas las clasificaciones fueron realizadas mediante la serie temporal de datos horarios. Los criterios de cada una de las clasificaciones son aplicados a la serie de datos obteniendo el total de horas con viento zonda y, en función de lo obtenido, se separan los eventos. No debe confundirse un evento de zonda con un día de zonda, ya que el evento puede abarcar dos días distintos.

El hecho de que existan pocos estudios, y que no se cuenta con una lista completa y detallada de los eventos de zonda ocurridos en San Juan, condujo a los autores a considerar, en una primera instancia, que la clasificación subjetiva (CS, definida a continuación) fuera utilizada como referencia para evaluar las capacidades de los MCO.

Clasificación Subjetiva

La clasificación subjetiva de los eventos de viento zonda en superficie se realizó siguiendo el método de los tres puntos. La dirección del viento, los cambios abruptos en la temperatura y principalmente una intensa y rápida disminución de la temperatura de rocío se consideraron como principales indicadores de la presencia del fenómeno. Como primera condición se eliminaron los datos horarios de calma y se seleccionaron aquellas mediciones tales que la dirección del viento se presentase dentro del intervalo $(200^\circ, 20^\circ]$ (es decir con una componente del viento perpendicular a la barrera orográfica). Considerando que se trata de un fenómeno que presenta gran variabilidad, principalmente en su rafagosidad, es de esperar que los valores de velocidad de viento excedan cierto umbral. Teniendo en cuenta esto, se calculó la distribución de velocidades para todos los datos horarios seleccionados anteriormente y se definió que sólo aquellos datos horarios cuyas velocidades fuesen mayores o iguales al percentil 75 de dicha distribución (que corresponde a un valor de 3.6 m s^{-1}) podrían

pertenecer a un evento de zonda. Una vez realizado este filtrado se examinaron los datos para determinar la presencia de viento zonda. Para esto se tuvieron en cuenta los cambios abruptos en la temperatura y en la temperatura de rocío, considerando aumentos del orden de 3-5°C/hora y disminuciones del orden de 10-20°C/hora respectivamente, como así también la presencia de fenómenos significativos de tiempo presente del código synop de viento fuerte y tempestad de polvo.

Clasificación Objetiva

Siguiendo el trabajo de Dürr (2008), en todos los MCO se consideró que la dirección del viento estuviese dentro del intervalo (200°; 20°] y que la velocidad fuera mayor al percentil 90 de la distribución de velocidades de todos los datos horarios (sin calmas y sólo de aquellas direcciones antes descriptas). Además, la temperatura de rocío debe ser menor al percentil 10 de dicha distribución, resultando para la estación de estudio:

- Percentil 90 de velocidad = 5.66 m s⁻¹
- Percentil 10 de temperatura de rocío = -5.6°C

A continuación se describen los distintos métodos propuestos para la clasificación objetiva. En ellos, dado que los valores de dirección y velocidad del viento fueron predefinidos, se evalúa principalmente la capacidad de las variables de temperatura (T) y temperatura de rocío (Td) para clasificar un evento.

1. Clasificación por Temperatura Máxima y temperatura de rocío mínima (CTMAX)

Este método de clasificación fue propuesto por Norte (1988) en su tesis doctoral. La detección de eventos de Zonda se desarrolló a partir de un conjunto de variables, o combinación de las mismas, consideradas a priori como relevantes para identificar la ocurrencia del Viento Zonda. Entre ellas se considera que una medición pertenece a un evento de zonda si:

- La diferencia entre la temperatura máxima del día y la temperatura máxima media del mes es mayor o igual que 4°C.
- La diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura de punto de rocío mínima del mismo día es mayor o igual que 20°C.

Siguiendo a Gutermann (1970), se consideran las clasificaciones mediante la utilización de anomalías estacionales y diarias.

2. Clasificación por Anomalías Diarias de temperatura y temperatura de rocío (CAD)

Las anomalías se calculan con toda la serie de datos horarios. Luego de aplicar el filtro por dirección, velocidad y Td se calcula la distribución resultante de anomalías de T y Td y en función de estas distribuciones se aplican los siguientes criterios:

- Anomalía de temperatura mayor al percentil 90 de su distribución y anomalías de temperatura de rocío menor al percentil 10 de su distribución.
- Diferencia entre la anomalía de temperatura y la anomalía de temperatura de rocío mayor al percentil 90 de dicha distribución.
- Percentil 90 de T' = 8.1°C.
- Percentil 10 de Td' = -8.1°C.
- Percentil 90 de T'-Td' = 21.55°C.

3. Clasificación por Anomalías Diarias Estacionales de temperatura y temperatura de rocío (CADE)

Las distribuciones fueron calculadas al igual que en el método CAD en función de las anomalías estacionales:

- Anomalías estacionales de temperatura mayor al percentil 90 de su distribución y anomalías estacionales de temperatura de rocío menor al percentil 10 de su distribución.
- Diferencia entre la anomalía estacional de temperatura y la anomalía estacional de temperatura de rocío mayor al percentil 90 de dicha distribución.
- Percentil 90 de T' = 14.1°C.
- Percentil 10 de Td' = -7.47°C.
- Percentil 90 de T'-Td' = 22.87°C.

Para que un evento sea clasificado como “evento de viento zonda” al menos dos datos horarios tienen que cumplir los criterios preestablecidos por los métodos de clasificación. Este criterio solo se considera con el fin de remover datos espurios, aunque la presencia del fenómeno puede durar menos de dos horas claro está pero sería muy difícil de observar con datos horarios.

RESULTADOS

Métodos de clasificación

Las principales dificultades encontradas en la CS se encontraron en la determinación de la hora de inicio, en la cual la variable más representativa parece ser la Td y, más difícil aún, la hora de finalización del evento, donde la variable más representativa parece ser la rotación del viento. La dificultad en la clasificación aumenta en la determinación de un evento en la época cálida debido a que los cambios, principalmente en la temperatura, no son tan claros como en la temporada fría.

Los resultados obtenidos de cada uno de los MCO se compararon respecto de la clasificación subjetiva. Para esto, se tuvo en cuenta la cantidad de datos horarios coincidentes entre los MCO y la CS. La cantidad de eventos clasificados por cada uno de los MCO dependerá de la existencia de horas coincidentes de cada evento, recordando que para definir un evento son necesarias, al menos, dos horas.

La Figura 1 muestra el total de eventos, el total de horas clasificadas como zonda y aquellas horas coincidentes con la CS para los tres MCO. La cantidad de eventos clasificados por el método CADE es de 132, seguido del método CAD con el 121 y finalmente el método CTMAX logró clasificar 114 eventos. El método CADE arrojó un total de 853 horas clasificadas como zonda de las cuales 796 coinciden con las clasificadas subjetivamente. El método CAD clasificó 652 horas como zonda, de las cuales 630 coinciden y el CTMAX clasificó 742 horas de zonda, con 683 horas coincidentes. El método con mayor cantidad de horas y eventos coincidentes fue el CADE. Sin embargo, este método contiene 57 horas clasificadas como zonda que no fueron clasificadas en la CS. Por otro lado, el método CAD presentó sólo 22 horas no coincidentes pero una cantidad no menor de eventos faltantes (14). El CTMAX resultó ser el que menor cantidad de eventos clasifica pero con más horas coincidentes que el CAD y con la mayor cantidad de horas clasificadas no coincidentes de los tres.

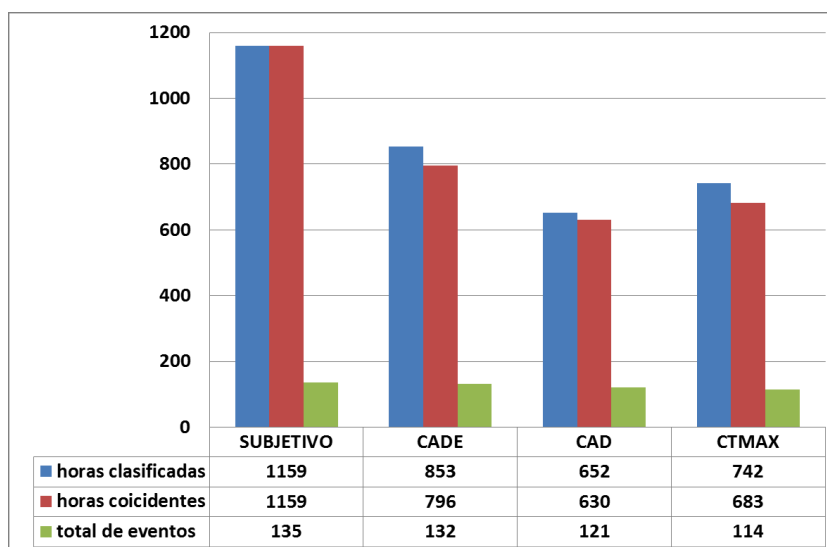


Figura 1. Frecuencia absoluta de eventos, de horas clasificadas como zonda y de horas coincidentes para los MCO.
Figure 1. Absolute frequency of events classified as zonda hours and coincident hours for the OCM.

Climatología

Ciclo diario y anual

Se efectuó una climatología del viento zonda con cada uno de los MCO y CS. Para ello, a cada una de las series de datos obtenidas se le removieron aquellas horas clasificadas no coincidentes con la CS. En la Figura 2 se muestra la distribución porcentual del ciclo diario de los eventos de zonda. En todos los casos se observa una mayor frecuencia de ocurrencia desde el mediodía hasta la noche, con un máximo a las 19UTC. Los mínimos de frecuencia se observan antes de las 6 UTC y luego de las 13 UTC en horas de la madrugada y la mañana como

han encontrado distintos autores (Richner y Gutermann, 2007, entre otros). Todos los métodos subestiman la cantidad de horas clasificadas como se vio anteriormente. El método CADE es el que mejor se aproxima a la CS, mientras que el CTMAX subestima evidentemente la cantidad de horas entre las 0 UTC y las 6 UTC y el método CAD lo hace entre las 15 UTC y las 23 UTC.

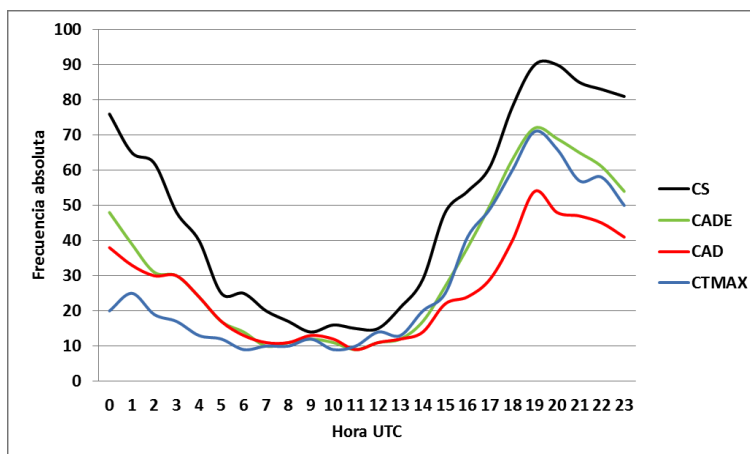


Figura 2. Frecuencia absoluta diaria de horas con viento zonda para cada una de las clasificaciones.
Figure 2. Daily absolute frequency of zonda wind hours for each method.

La distribución mensual (Figura 3) presenta un máximo absoluto en el mes de septiembre y un máximo relativo en el mes de junio. Esta distribución es similar en todos los MCO. En los meses fríos, entre mayo y septiembre, el método CAD subestima la cantidad de horas, mientras que el método CTMAX lo hace entre los meses de Octubre a Diciembre.

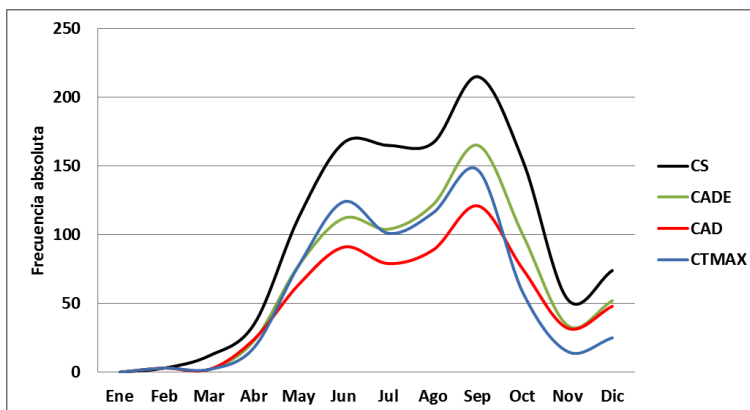


Figura 3. Frecuencia absoluta mensual de horas con viento zonda por cada método.
Figure 3. Monthly absolute frequency of zonda wind hours for each method.

Duración, hora de inicio y fin

Debido a que el fenómeno de viento zonda podría no ser continuo en el tiempo, existen casos en que el evento se detiene en algún momento del día para continuar más tarde el mismo día. Estas horas intermedias sin viento zonda fueron eliminadas y la duración del evento se consideró en base a aquellas mediciones que cumplieron las condiciones antes mencionadas. La duración promedio obtenida en la clasificación subjetiva fue de 8,58 horas mientras que en los métodos CTMAX, CAD y CADE fueron de 5,99 hs, 5,21 hs y 6,03 hs respectivamente. En la Figura 4 se observa la frecuencia absoluta de duración de los eventos para todos los métodos. Se puede apreciar cómo los MCO sobrestiman la duración de los eventos menores a 9 hs y subestiman aquellos eventos de mayores duraciones. Particularmente, más del 80% de los eventos clasificados por los MCO presentan duraciones menores a 9 horas, cuando para la CS este valor es de 60%.

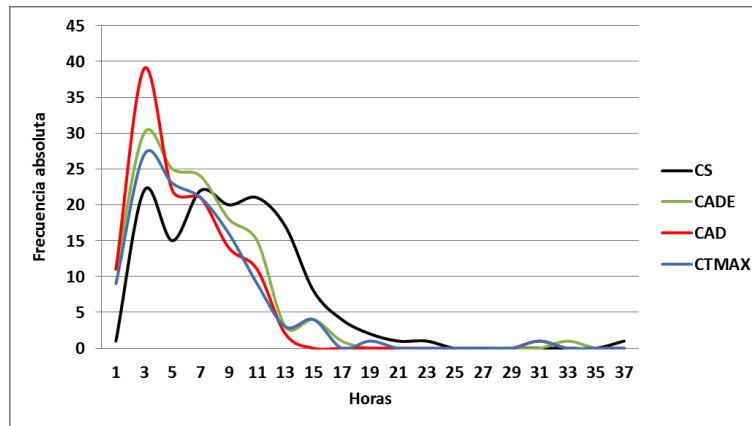


Figura 4. Frecuencia absoluta de duración de eventos para cada método.
Figure 4. Absolute frequency of zonda events duration for each method.

La hora de inicio más frecuente de los eventos de viento zonda se encuentra entre las 15 UTC y 18 UTC (Figura 5a). El método CTMAX presenta un máximo bien marcado a las 16 UTC y a las 19 UTC, exactamente 1 hora desfasada de la CS, mientras que subestima los inicios después de las 20 UTC. Los métodos CAD y CADE subestiman fuertemente el inicio temprano de los eventos, como puede verse a las 15 UTC. Las horas de finalización de los eventos (figura 5b) de viento zonda son más frecuentes entre las 20 UTC y las 4 UTC. El método CTMAX presenta una frecuencia elevada a la hora 23 UTC (26,3%), posiblemente debido a que se utilizó la temperatura máxima del día, la cual cambia a las 0 UTC. Además se observa un déficit entre las horas 0 UTC y 6 UTC, por lo que este método no sería confiable para encontrar la hora de finalización de los eventos. Los métodos CAD y CADE parecen seguir bien la distribución entre las 0 UTC y las 5 UTC, pero sobreestiman la finalización en horas del mediodía/tarde.

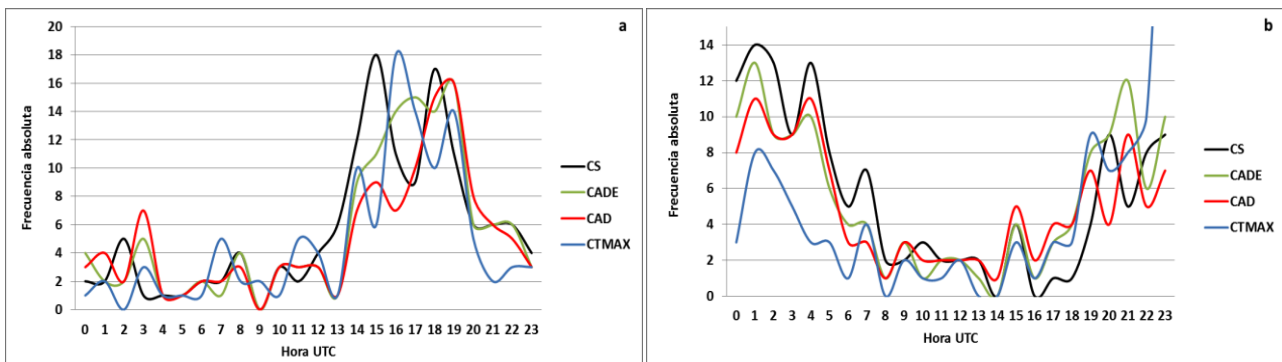


Figura 5. Frecuencia absoluta de hora de inicio (a) y fin (b) de los eventos de zonda para cada método.
Figure 5. Onset (a) and Offset (b) absolute frequency of zonda events for each method.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

El hecho de que existan pocos estudios y que no se cuente con una lista completa y detallada de los eventos de zonda ocurridos en San Juan condujo a los autores a realizar una clasificación subjetiva de los casos analizando toda la serie de datos horarios disponible para dicha estación. Las principales dificultades encontradas en esta clasificación se vieron en la determinación de la hora de inicio y de finalización del evento. Teniendo en cuenta estas dificultades, y conociendo que podría no ser la más óptima, se consideró, en primera instancia, la clasificación subjetiva como referencia para evaluar las capacidades de los MCO.

Los MCO mostraron ser eficientes en la clasificación de estos eventos de zonda aunque, debido tal vez a la exigencia de los criterios, todos los MCO subestiman la duración de los eventos. Sin embargo, no se puede asegurar que las horas que no fueron coincidentes con la CS no correspondan a eventos de zonda, ya que la CS podría presentar errores también.

El método CADE clasificó un gran porcentaje de horas y eventos coincidentes con la CS, siendo el que mejor podría representar la presencia de un evento y su duración. El método CAD, representa bien la cantidad de eventos pero subestima la duración de los mismos. Mientras que el método CTMAX no resuelve bien la cantidad

de eventos, pero si mejora, mostrando una mayor cantidad de horas coincidentes que el CAD, en cuanto a la duración de los mismos.

Todos los métodos de diagnóstico para foehn tienen en común que sus aplicaciones funcionan de forma automática y objetiva, mientras que en otros casos las estimaciones de los umbrales suele realizarse de forma manual y subjetivamente. En este trabajo se realiza una primera exploración de dichos métodos con la importante problemática respecto a la forma de clasificar los eventos de viento zonda mediante el uso de una estación de superficie. Las desventajas de los métodos objetivos se deben principalmente a los exigentes criterios aplicados, los cuales no pueden atrapar toda la banda de eventos de foehn de un lugar determinado presentando un importante faltante de horas clasificadas lo que conlleva a un error en la hora de inicio, fin y duración del evento. Por otro lado, debido a la distribución espacial y temporal del fenómeno, ciertas características del zonda no son capturadas por los métodos. En ciertas ocasiones el zonda desciende en alguna región cercana a la estación y no propiamente en dicho lugar, mientras que otras veces sólo se produce una ráfaga de corta duración que no queda registrada en los datos horarios de las libretas meteorológicas o simplemente la estación de superficie no mide dicha variable. Estas problemáticas no fueron abordadas en el trabajo y se plantean como discusión para trabajos futuros.

Aun teniendo en cuenta las problemáticas que se discuten, los MCO logran captar las características básicas del fenómeno. Una mejora a estos métodos puede evaluarse en función de cambios en los criterios y de las variables elegidas, como así también teniendo en cuenta la posibilidad de un método que considere varias estaciones de superficie.

Las características climatológicas deben tenerse en cuenta a la hora de emitir un pronóstico del fenómeno ya que el mismo presenta ciclos bien marcados de ocurrencia. Los eventos de zonda en San Juan mostraron una mayor frecuencia de ocurrencia en el mes de septiembre con un máximo relativo en el mes de junio, principalmente entre el mediodía y la noche, con un máximo a las 19 UTC. Los mínimos de frecuencia se observan antes de las 6 UTC y luego de las 13 UTC en horas de la madrugada y la mañana. La hora de inicio más frecuente de los eventos de viento zonda se encuentran entre las 15 UTC y las 18 UTC, mientras que la hora de finalización de los eventos de viento zonda es más frecuente luego de las 20 UTC y hasta las 4 UTC.

REFERENCIAS

- Armi, L., y Farmer, D., (2002). Stratified flow over topography: bifurcation fronts and transition to the uncontrolled state. *Proceedings: Mathematics, Physical and Engineering Sciences*: 513-538.
- Conrad, V., (1936). *Handbuch der Klimatologie*, chap. Die klimatologischen Elemente und ihre Abhängigkeit von terrestrischen Einflüssen, 1146–1166. Borntäger.
- Durr, B., (2008). Automatisiertes Verfahren zur Bestimmung von Föhn in Alpentalern. *Arbeitsbericht*, 223. MeteoSchweiz.
- Farmer, D., y Armi, L., (2001). Stratified flow over topography: models versus observations. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 457 (2016): 2827-2830.
- Gutermann, T., (1970). Vergleichende Untersuchungen zur Föhnhäufigkeit im Rheintal zwischen Chur und Bodensee. No. 18 in *Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt*, City-Druck AG, Zürich.
- Huschke, R.E., (1959). *Glossary of meteorology*. American Meteorological Society: 638 p. Boston.
- Mayr, G.J., Armi, L., Arnold, S., Banta, R.M., Darby, L.S., Durran, D.D., y Whiteman, C.D., (2004). Gap flow measurements during the Mesoscale Alpine Programme. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 86 (1-2): 99-119.
- Mayr, G.J., Armi, L., Gohm, A., Zängl, G., y Durran, D.R., (2007). Gap flows: Results from the Mesoscale Alpine Programme. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133: 881-896.
- Norte, F., A., (1988). *Características del viento Zonda en la Región de Cuyo*. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires: 255 p.
- Norte, F., A., Seluchi, M., E., (1993). Objective methods for the zonda forecasting using information from surface and height. *Preprints of the fourth international conference on the southern hemisphere meteorology and oceanography*. American Meteorological Society. March 29–April 2 1993: 128–129. Hobart, Australia.
- Obenland, E., (1956). *Untersuchungen zur Föhnstatistik des Oberallgäus (Investigations for the foehn statistics of the Oberallgaeus)*. *Ber. DWD*, 4: 37 p.
- Osmond, H., (1941). The chinook wind east of the Canadian Rockies. *Canadian Journal of Forest Research.*, 19: 57–66.
- Plavcan, D., Mayr, G., J. y Zeileis, A., (2014). Automatic and probabilistic foehn diagnosis with a statistical mixture model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53 (3): 652-659.
- Richner, H. y Gutermann, T., (2007). Statistical analysis of foehn in Altdorf, Switzerland. In *Extended Abstracts Vol. 2. International Conference on Alpine Meteorology*. June 4 to 8, 2007: 457-460. Chambéry, France.
- Smith, R. B., (1985). On severe downslope winds. *Journal of the atmospheric sciences*, 42 (23): 2597-2603.

Vergeiner, J., (2004). South foehn studies and a new foehn classification scheme in the Wipp and Inn valley. Ph.D. thesis, Universität Innsbruck.

Recibido: 30/10/2014
Aceptado: 17/08/2015