

Desarrollo y aplicación de un índice estandarizado de peligrosidad de heladas

Serio, L.; Fernández Long, M.E.

RESUMEN

Las heladas representan uno de los principales factores de riesgo agroclimático. Su peligrosidad depende no sólo de la temperatura mínima alcanzada, sino también de su relación con los registros históricos para la misma época y lugar. En este trabajo se presenta el Índice Estandarizado de Peligrosidad de Heladas (IEPH) y se propone una categorización de las heladas por niveles de peligrosidad, basada en rangos de valores del IEPH. Luego se aplicó el índice con el objetivo de analizar y clasificar las heladas agrometeorológicas ocurridas durante el comienzo de la temporada invernal de 2025 en seis localidades del centro y el norte de la Argentina. Los resultados muestran que las localidades ubicadas más al sur tuvieron más casos y en su mayoría con peligrosidad baja, mientras que en las del norte la mitad de los eventos fue de alta peligrosidad. Por último, se realizó un estudio de caso para un evento particular de ola de frío, con temperaturas mínimas de hasta -7 °C, obteniendo como resultado una clasificación de peligrosidad extrema en cada una de las localidades analizadas y tiempos de recurrencia entre 50 y 150 años.

Palabras clave: agrometeorología; riesgo; adversidades; frío

Serio, L.; Fernández Long, M.E., 2025. Development and implementation of a standardized frost hazard index. RADA XVI: 29-38

SUMMARY

Frosts represent one of the main agroclimatic risk factors. Their hazardousness depends not only on the minimum temperature reached, but also on its relationship with historical records for the same time and place. This paper presents the Standardized Frost Hazard Index (SFHI) and proposes a categorization of frosts by hazard level, based on SFHI value ranges. The index was then applied to analyze and classify agrometeorological frosts that occurred during the beginning of the 2025 winter season in six locations in central and northern Argentina. The results show that the southernmost locations had more frost cases and mostly with low hazard, while in the northern locations, half of the events were of high hazard. Finally, a case study was conducted for a particular cold wave event, with minimum temperatures as low as -7°C, resulting in an extreme hazard classification for each of the analyzed locations and recurrence times between 50 and 150 years.

Key words: agrometeorology; risk; adversities; cold

Serio, L.; Fernández Long, M.E.: Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Av. San Martín 4453, C1417DSE CABA, Argentina.

Correspondencia a: serio@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

La actividad agropecuaria suele estar condicionada por distintos factores de riesgo, entre los cuales se incluyen adversidades climáticas como el granizo, las sequías, las inundaciones, los golpes de calor y las heladas. Todos ellos son relevantes por su potencial impacto en el rendimiento y la calidad de los cultivos y, por ende, en la economía de todos los actores que intervienen en la cadena de producción y comercialización (Crofils *et al.*, 2024).

Según Andrade y Laporta (2009), el riesgo agroclimático posee dos dimensiones: la peligrosidad y la exposición. La primera se puede cuantificar a partir de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno climático adverso, mientras que la segunda dependerá de la reducción estimada en los rendimientos, resultante del impacto de tal fenómeno. De acuerdo con la Teoría Social del Riesgo (Natenzon y Ríos, 2015), deberíamos sumar una tercera dimensión: la vulnerabilidad, que es inherente al productor afectado, y que estará asociada en forma inversa con la resiliencia o capacidad de sobreponerse a dicho impacto (Gitz y Meybeck, 2012).

Como objeto de estudio, las heladas pueden ser abordadas desde distintos puntos de vista, y cada uno de estos da lugar a una definición diferente, entre las cuales se destacan las siguientes (Fernández Long y Barnatán, 2013):

- Helada agrícola: cuando el descenso térmico alcanza temperaturas que producen algún daño a las plantas. Depende de factores como la especie o variedad considerada, fase fenológica, condiciones sanitarias y/o hídricas previas, etc.
- Helada meteorológica: cuando la temperatura registrada dentro del abrigo meteorológico cae hasta valores iguales o menores a 0 °C.

Este criterio permite hacer estudios generales y geográficamente más extensivos que el anterior.

- Helada agrometeorológica: cuando la temperatura registrada dentro del abrigo meteorológico cae hasta valores iguales o menores a 3 °C. Cabe aquí la misma aclaración que en el caso anterior, pero la elección de un umbral térmico más alto responde a un criterio agrometeorológico, ya que considera que puede haber una diferencia de temperatura cercana a los 3 °C entre el abrigo meteorológico y los órganos vegetales expuestos a la intemperie y más cerca del suelo (Lhomme y Guilioni, 2004).

Müller (2007) identificó las características de la circulación atmosférica a gran escala que contribuyen al descenso térmico en el centro y este de la Argentina. Destacó que las heladas generalizadas ocurren en presencia de un centro de alta presión sobre el centro del país, mientras que las que afectan parcialmente a la región se asocian al desplazamiento de un centro de baja presión por el océano Atlántico sur y el pasaje de un frente frío sobre el continente. Mas allá de estas características de gran escala, la intensidad de las heladas y sus impactos son muy variables en la microescala. Factores locales como ondulaciones del terreno y diferentes texturas del suelo, tipos de cobertura y contenido de humedad contribuyen a la variabilidad espacial de su intensidad y duración (Snyder y Melo-Abreu, 2010).

En la determinación de la aptitud agrícola a escala local o regional, la consideración del régimen de heladas ocupa un lugar preferencial por su incidencia directa sobre la productividad de los cultivos (Pascale y Damario, 2004). La caracterización agroclimática de las heladas se basa en el uso de distintos índices, entre ellos las fechas medias de las primeras y de las últimas heladas, la duración media del período con heladas y la frecuencia media anual de heladas

(Fernández Long *et al.*, 2016). Teniendo en cuenta la mayor susceptibilidad de las plantas expuestas a las primeras heladas del otoño o a las últimas de la primavera, se suele utilizar como medida de peligrosidad a la probabilidad de ocurrencia de heladas en función de la fecha, tanto al inicio como al fin del período con heladas. Dicha probabilidad dependerá de la dispersión interanual de las fechas de primeras o últimas heladas alrededor de sus respectivos valores medios.

Numerosos estudios señalan que el cambio climático está modificando los patrones de ocurrencia de heladas, ya sea por una reducción en la frecuencia, corrimientos en la estacionalidad o eventos extremos más intensos o inesperados para la época. Evidencias de ello han sido presentadas, entre otros, por Strong y McCabe (2017) y Kukal e Irmak (2018) para los Estados Unidos, Graczyk y Szwed (2020) y García-Martin *et al.* (2021) para Europa, Crimp *et al.* (2016) para Australia y Fernández Long *et al.* (2013) para Argentina. Xiao *et al.* (2018) y Lamichhane (2021), entre otros, advirtieron sobre el creciente riesgo de las heladas primaverales ante el adelanto en la fenología de la vegetación en latitudes medias. La mayor incertidumbre en la ocurrencia de estos fenómenos representa un nuevo desafío para la gestión agropecuaria, en especial en países con fuerte dependencia del clima, como la Argentina. Surge de allí la necesidad de mantener permanentemente actualizadas las bases de datos, recalcular los valores de referencia correspondientes a fechas medias y sus medidas de dispersión y aplicar esta información para generar índices de peligrosidad.

Los índices desarrollados en la Argentina para cuantificar los riesgos por heladas priorizan diferentes variables en función de la finalidad para la cual fueron propuestos. El Índice Criokindinoscópico (ICK) (Burgos, 1963) fue desarrollado para la evaluación climática del riesgo de heladas a nivel regional. Para las heladas otoñales o primaverales se expresa como la temperatura media normal en la fecha en que la probabilidad de heladas tempranas o tardías, respectivamente, se reduce al 20%. Para ello, requiere conocimiento previo de las fechas medias de primera y última heladas y su correspondiente variabilidad interanual (Fernández Long y Barnatán, 2013).

Por su parte, Pascale y Damario (1958, citado por Pascale y Damario, 2004) desarrollaron el Índice de Peligrosidad de Heladas (IPH) con el objetivo de determinar el peligro de heladas para un lugar y un cultivo determinados, considerando temperaturas mínimas perjudiciales para los momentos previos a la floración, plenitud de

floración y pequeños frutos verdes. Su principal desventaja es que requiere gran cantidad de información fenológica del cultivo sobre el cual se vaya a aplicar y los niveles térmicos que pueden provocar daños en cada fase.

Fernández Long *et al.* (2008) desarrollaron el Índice de Riesgo Sistémico por Heladas (IRSH), aplicado para el cultivo de trigo. Este índice combina dos funciones, una dependiente de la fecha, asociada a la fenología del cultivo y su resistencia a las bajas temperaturas, y la otra dependiente de la temperatura mínima alcanzada, como medida de la intensidad de la helada.

Blasón *et al.* (2018) propusieron un Índice de Peligrosidad Anual de Heladas (IPAH) obtenido a partir de sumas térmicas acumuladas desde principio de año hasta la fecha con 20% de probabilidad de ocurrencia de heladas tempranas y desde mitad de año hasta la fecha con 20% de probabilidad de ocurrencia de heladas tardías. Con este índice, detectaron aumentos de peligrosidad en varias localidades argentinas, atribuibles a mayores acumulaciones térmicas que podrían acelerar el desarrollo de los cultivos, exponiéndolos a daños por heladas en momentos de mayor susceptibilidad.

El uso de índices estandarizados para categorizar factores de riesgo agroclimático ya ha sido probado y ampliamente aceptado con otras variables, sobre todo en índices de sequías, ya sea a partir de la precipitación (Lloyd-Hughes y Saunders, 2002; Serio *et al.*, 2010), la diferencia precipitación-evapotranspiración (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Sosa *et al.*, 2020) o la humedad del suelo (Carrão *et al.*, 2016; Sosa *et al.*, 2025). También se han utilizado para cuantificar anomalías de temperaturas (Li *et al.*, 2021; Dubois y Larocque, 2024), pero no hay registros de su aplicación para categorizar riesgo o peligrosidad de heladas. Sin embargo, un índice con estas características presenta como ventajas que permite determinar la severidad de cada helada en particular, haciéndola comparable con otras heladas ocurridas en el mismo sitio y otras épocas del año, con eventos ocurridos en otras localidades y hasta con otros tipos de adversidades clasificadas con índices similares.

El objetivo general de este trabajo es presentar un nuevo índice de heladas: el Índice Estandarizado de Peligrosidad de Heladas (IEPH). El IEPH se sustenta sobre la hipótesis de que la peligrosidad de las heladas, desde el punto de vista agrometeorológico, no varía sólo en función de la temperatura mínima (T_m) alcanzada. Un mismo valor de T_m puede tener distinto nivel de

peligrosidad dependiendo del lugar y la época de ocurrencia. Por lo tanto, se realizará una evaluación de la peligrosidad de las heladas basada en los datos históricos de T_m registrados localmente y herramientas de análisis estadístico para estandarizar la variable. Además, se propondrá una categorización en distintos niveles de peligrosidad en función de valores del IEPH, y se aplicará este índice a los casos de heladas agrometeorológicas registrados durante la primera parte del invierno 2025 en el centro y norte de la Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

La base de datos utilizada en este trabajo fue provista por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y consta de registros diarios de temperatura mínima del período 1991-2020, utilizado como período base para determinar la climatología de las T_m en cada localidad, y los datos de esta variable registrados entre el 15 de mayo y el 15 de julio de 2025, utilizados para detectar la ocurrencia de heladas y determinar su nivel de peligrosidad. Se tuvieron en cuenta seis localidades (Figura 1): Pehuajó (Buenos Aires), Laboulaye (Córdoba), Rosario (Santa Fe), Concordia (Entre Ríos), Monte Caseros (Corrientes) y Resistencia (Chaco). La elección se basó en criterios de extensión territorial y calidad de la base histórica de datos.

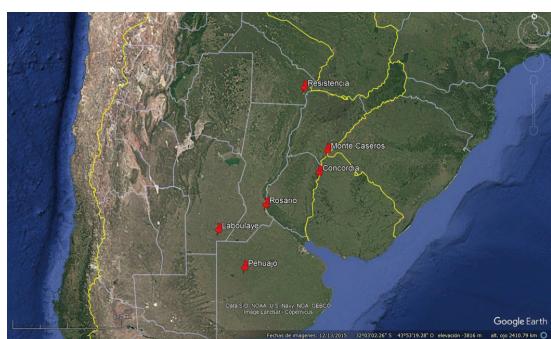


Figura 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Para el desarrollo del índice, se asumió que los datos de T_m se ajustan a una función de distribución normal (Krakauer, 2024). Por lo tanto, se pueden utilizar los parámetros de dicha función para estandarizar la variable y luego asociar cada valor de T_m con su correspondiente probabilidad de ocurrencia, que irá variando día a día en función de los registros históricos de cada fecha y localidad.

Con los datos del período base, se calcularon el promedio y el desvío estándar de la T_m para cada día del año. Para reducir el ruido generado por la

variabilidad diaria de la temperatura mínima se aplicó, en primera instancia, un filtro de promedios móviles de 21 días y, en segunda instancia, un ajuste a una función senoidal de período igual a 365 días. Esto se aplicó, tanto para los promedios diarios de T_m (Figura 2), como para sus desvíos estándar diarios (Figura 3). En ambos casos, las variables a ajustar fueron el valor medio (C), la amplitud (A) y la fase (ϕ). El ajuste se realizó con un programa de desarrollo propio en lenguaje R, corrido con el programa RStudio (Posit Software PBC, Boston, MA). De esta manera, la T_m media ajustada de cualquier día del año ($t = [1, 365]$) se obtuvieron de:

$$\bar{T}_{m(t)} = C + A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{365} + \phi\right) \quad (1)$$

y los valores diarios del desvío estándar $\sigma_{(t)}$ de las T_m se obtuvieron de:

$$\sigma_{(t)} = C' + A' \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{365} + \phi'\right) \quad (2)$$

El IEPH corresponde ser calculado solamente cuando la T_m diaria sea menor o igual a 3 °C, umbral definido para la ocurrencia de heladas agrometeorológicas (Fernández Long y Barnatán, 2013). Cumplido este requisito, el IEPH será equivalente a la anomalía estandarizada de la T_m diaria:

$$\text{IEPH} = \frac{T_m - \bar{T}_{m(t)}}{\sigma_{(t)}} \quad (3)$$

El IEPH representa el número de desviaciones estándar en que la T_m ocurrida en un día en particular se aparta del valor climatológicamente esperado. Una de sus ventajas, al igual que con otros índices estandarizados, es la posibilidad de agrupar los eventos de heladas según categorías de peligrosidad (baja, moderada, alta o extrema), definidas a partir de la magnitud de los valores negativos del índice. Para ello, se adoptó un criterio análogo a la categorización de sequías aplicada al índice estandarizado de precipitación (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002), dada en la Tabla 1.

Tabla 1. Categorización de las heladas según valores del índice estandarizado de peligrosidad (IEPH), con sus correspondientes valores de probabilidad de ocurrencia y tiempo de recurrencia.

Valor del IEPH	Peligrosidad	Probabilidad (%)	Recurrencia (años)
0 > IEPH ≥ -1	Leve	34,1	2 a 6
-1 > IEPH ≥ -1,5	Moderada	9,2	6 a 15
-1,5 > IEPH ≥ -2	Alta	4,4	15 a 43
-2 > IEPH	Extrema	2,3	> 43

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros obtenidos en cada localidad luego de aplicar el ajuste mediante funciones senoidales a las T_m y sus desvíos estándar se presentan en la Tabla 2. Para la Ec.1, el coeficiente C, que corresponde a la T_m media anual, decrece de norte a sur con valores entre 15,7 °C en Resistencia y 9,7 °C en Pehuajó. El coeficiente A, que corresponde a la mitad de la amplitud anual de la T_m , decrece levemente de norte a sur, con valores entre 5,7 °C en Resistencia y 7 °C en Laboulaye. Los valores ajustados de ϕ (entre 1,24 y 1,29) indican que la T_m alcanza su valor medio diario más bajo entre el 18 y el 21 de julio. Para la Ec. 2 (desvío estándar de las T_m diarias), el coeficiente C toma valores entre 3,7 y 4,4 °C, sin un

patrón claro en relación con la latitud. En cambio, el coeficiente A indica que el desvío estándar de la T_m varía con mayor amplitud estacional en el norte (1,7°C en Resistencia) que en el sur (0,5 °C en Pehuajó). Según los valores ajustados de ϕ , la máxima variabilidad de las T_m ocurre más temprano en las localidades ubicadas más al sur (22 de junio en Pehuajó) y se atrasa hacia el norte (19 de julio en Resistencia). Las funciones obtenidas fueron representadas en las Figuras 2 y 3.

Los valores umbrales de IEPH iguales a 0, -1, -1,5 y -2 delimitan distintas categorías de peligrosidad de las heladas, según se indicó en la Tabla 1. En cada lugar y cada día del año estos valores corresponden a una T_m diferente, que se puede obtener invirtiendo la Ec.3. Con los valores así obtenidos, se puede construir

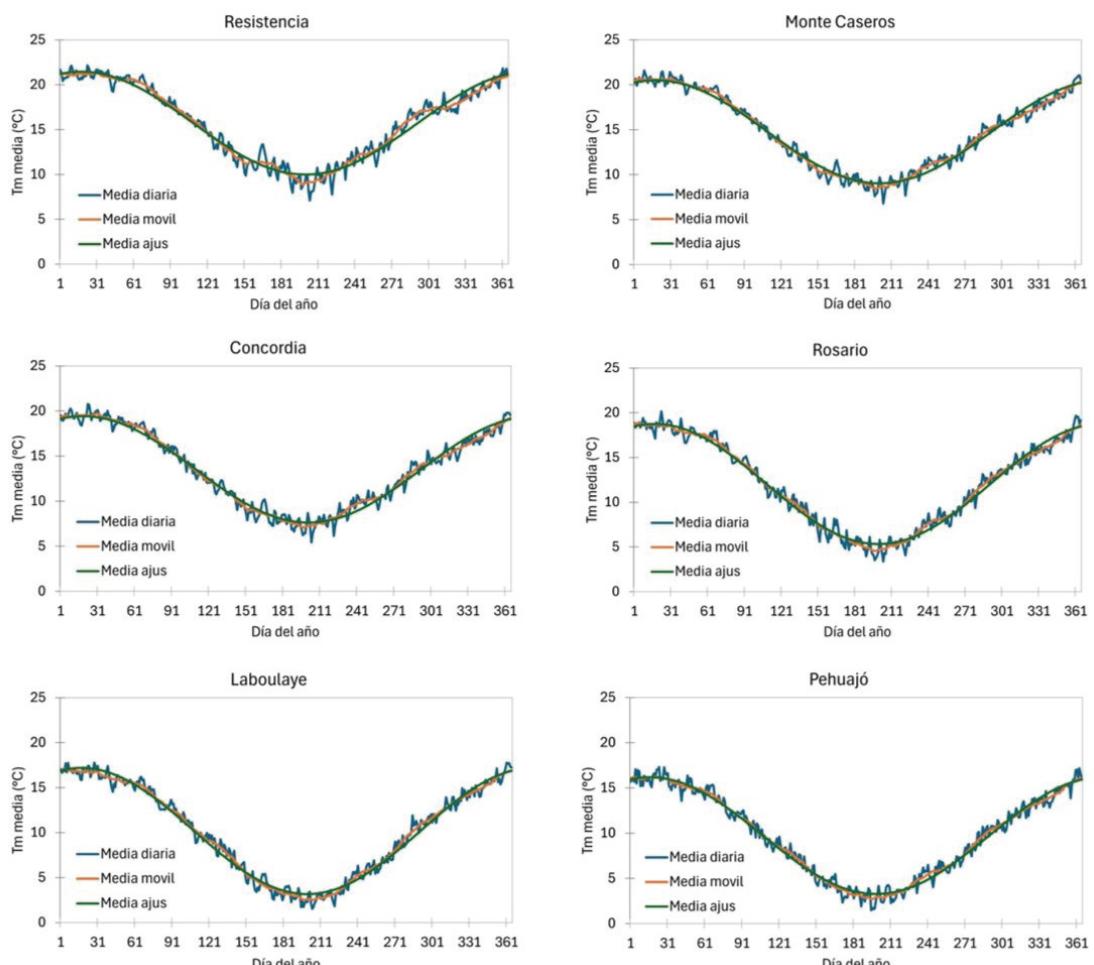


Figura 2. Marcha anual de la temperatura mínima diaria media (1991-2020), sus promedios móviles de 21 días y función senoidal ajustada, en cada una de las seis localidades.

Tabla 2. Parámetros ajustados de las funciones senoidales para el valor medio diario de las temperaturas mínimas (Ec.1) y su desvío estándar diario (Ec. 2) en seis localidades del centro y este de Argentina. Se indica en cada caso el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

Localidad	Función	C	A	Φ	R^2	RMSE
Resistencia	Ec. 1	15,72	5,73	1,26	0,96	0,86
	Ec. 2	4,36	1,71	4,43	0,86	0,48
Mte. Caseros	Ec. 1	14,77	5,76	1,25	0,97	0,66
	Ec. 2	3,68	1,22	4,54	0,82	0,40
Concordia	Ec. 1	13,52	5,90	1,24	0,97	0,71
	Ec. 2	3,98	1,34	4,55	0,80	0,47
Rosario	Ec. 1	12,04	6,71	1,27	0,98	0,74
	Ec. 2	4,06	1,14	4,60	0,68	0,55
Laboulaye	Ec. 1	10,18	7,01	1,27	0,98	0,71
	Ec. 2	3,75	0,76	4,66	0,55	0,48
Pehuajó	Ec. 1	9,73	6,45	1,29	0,98	0,70
	Ec. 2	3,78	0,48	4,87	0,34	0,30

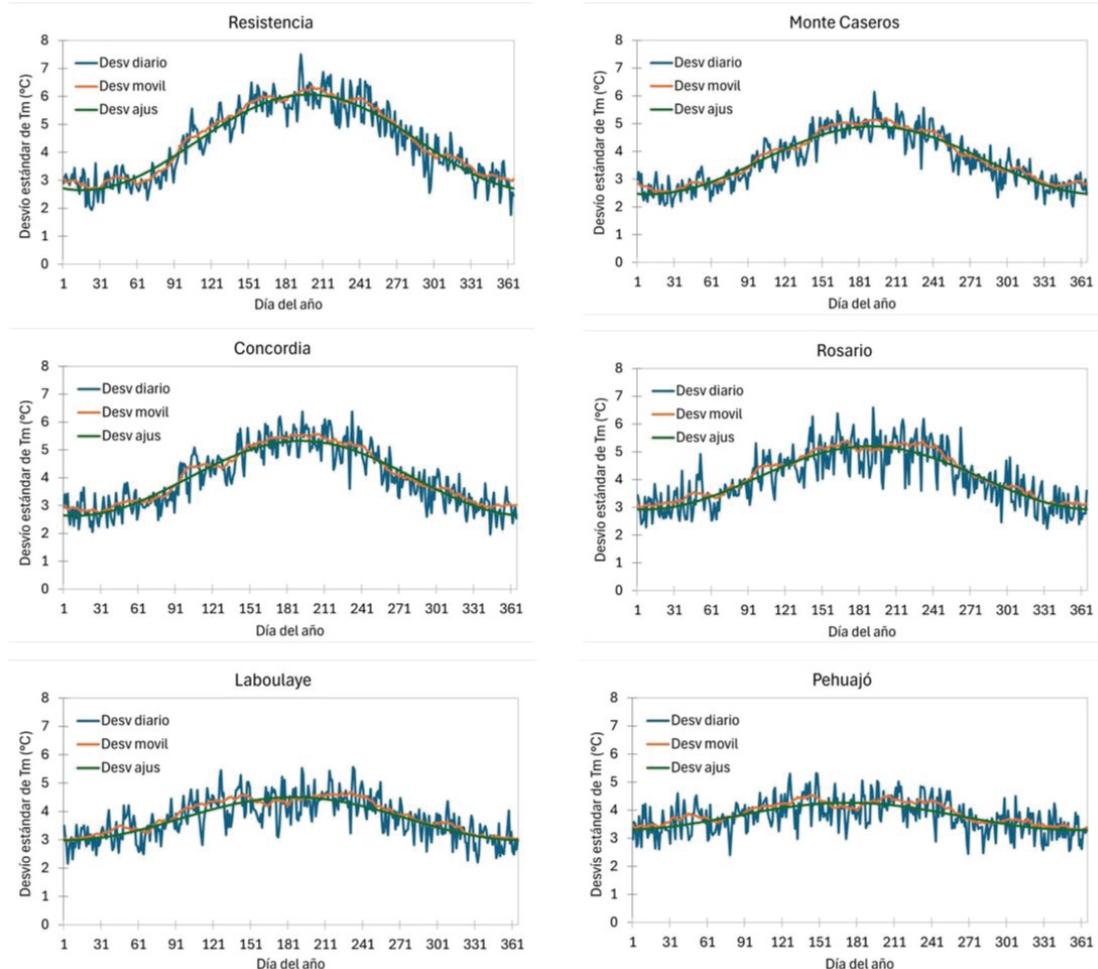


Figura 3. Marcha anual del desvío estándar de la temperatura mínima diaria (1991-2020), sus promedios móviles de 21 días y función senoidal ajustada, en cada una de las seis localidades.

una climatología local de las T_m que conducen a heladas de peligrosidad baja, moderada, alta o extrema durante el transcurso del año en cada lugar. Los resultados se muestran en la Figura 4. Allí se puede ver, por ejemplo, que cualquier helada agrometeorológica que se produzca en las localidades ubicadas más al norte (Resistencia y Monte Caseros) tendrá peligrosidad desde moderada a extrema, dependiendo de la fecha y la T_m que se registre. En las otras localidades se aprecia que, en el período más frío del año (promediando el mes de julio), al ser más frecuentes las bajas temperaturas, algunas heladas pueden tener baja peligrosidad, aunque el umbral térmico que las define varía desde 2,3 °C en Concordia hasta -1,3 °C en Laboulaye. También puede verse en la Figura 4 cómo los umbrales térmicos para

cada categoría de peligrosidad aumentan cuando se consideran fechas más tempranas o tardías.

El estudio particular de las temperaturas mínimas registradas en las seis localidades durante la primera parte del invierno 2025 permitió identificar ocurrencia de heladas agrometeorológicas en todas ellas. El detalle de la clasificación de peligrosidad mediante el IEPH se presenta en la Tabla 3. Pehuajó, Laboulaye y Rosario experimentaron más de 20 días con heladas; en las dos primeras predominaron los casos de baja peligrosidad, mientras que en Rosario hubo más casos de peligrosidad moderada. En Concordia y Resistencia, aunque la cantidad de casos fue menor, la mitad de ellos fueron clasificados con peligrosidad alta. En todas hubo al menos un caso categorizado como de peligrosidad extrema.

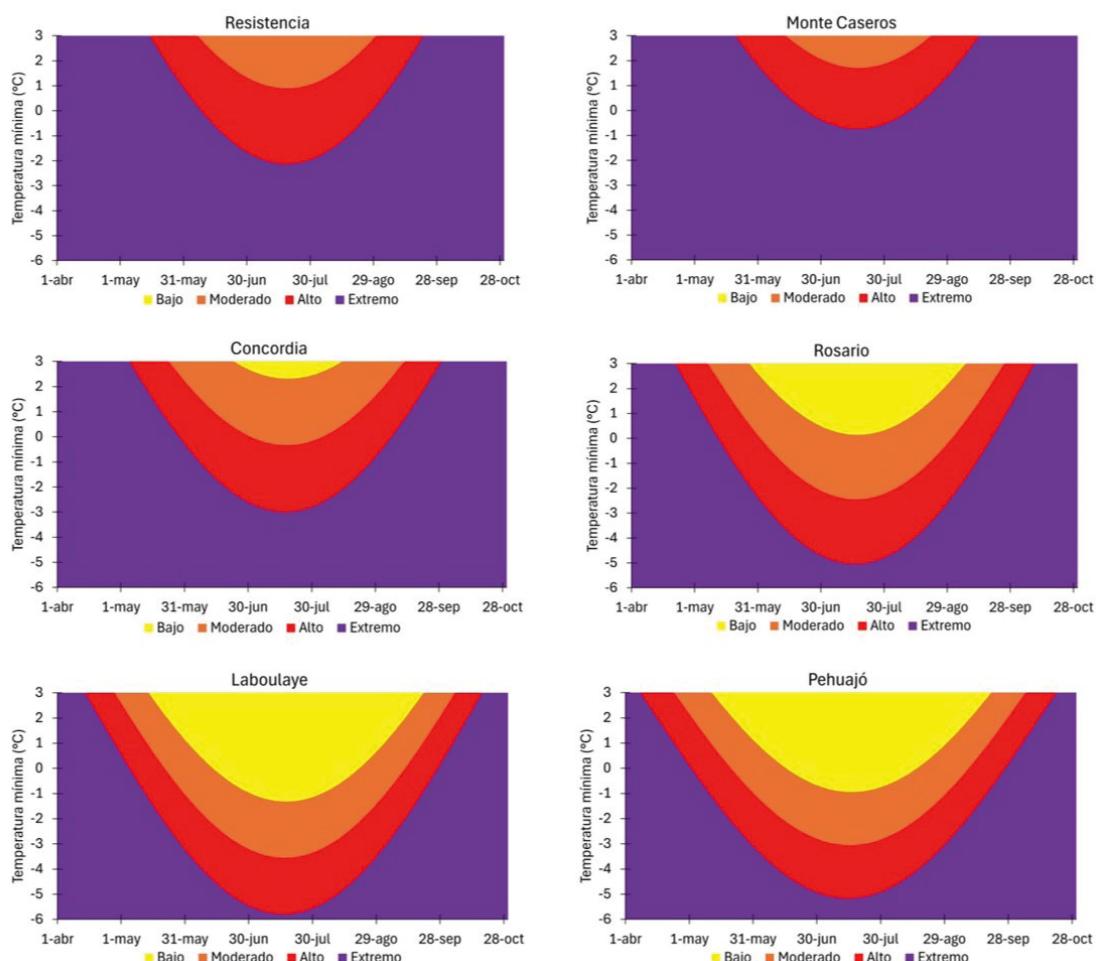


Figura 4. . Rangos de temperaturas mínimas asociados a heladas de peligrosidad baja, moderada, alta o extrema entre el 1º de abril y el 31 de octubre en cada una de las seis localidades analizadas.

Tabla 3. Casos de heladas (N) registrados entre el 15 de mayo y el 15 de julio de 2025 en seis localidades del centro y este de Argentina y su clasificación según el Índice Estandarizado de Peligrosidad de Heladas (IEPH).

Localidad	N	Peligrosidad			
		Baja	Moderada	Alta	Extrema
Resistencia	7	0	2	4	1
Mte. Caseros	6	0	3	2	1
Concordia	16	1	5	8	2
Rosario	26	6	14	4	2
Laboulaye	29	15	6	6	2
Pehuajó	21	15	4	1	1

En la Figura 5 se muestra la evolución diaria de la T_m y del IEPH en cada localidad. Se observa que los descensos térmicos registrados hacia fines de mayo y principios de junio no produjeron heladas en Resistencia y Monte Caseros. En las

demás localidades hubo heladas que fueron de peligrosidad moderada a alta en Concordia, moderada en Rosario, baja a moderada en Laboulaye y baja en Pehuajó. Luego hubo otros dos períodos de fuerte descenso térmico, uno entre el 22 y 24 de junio y el otro entre el 29 de junio y el 2 de julio. Este último formó parte de una ola de frío que alcanzó su pico en el centro y este del país el 1° de julio (excepto en Resistencia, donde la mínima temperatura se registró al día siguiente) y condujo a heladas de peligrosidad extrema en toda el área de estudio.

En la Tabla 4 se presenta el resultado de haber aplicado el IEPH a las temperaturas mínimas extremas registradas en cada localidad durante la mencionada ola de frío. A pesar de que la menor temperatura ($-7,1^{\circ}\text{C}$) se registró en Laboulaye, la mayor peligrosidad se obtuvo para Concordia,

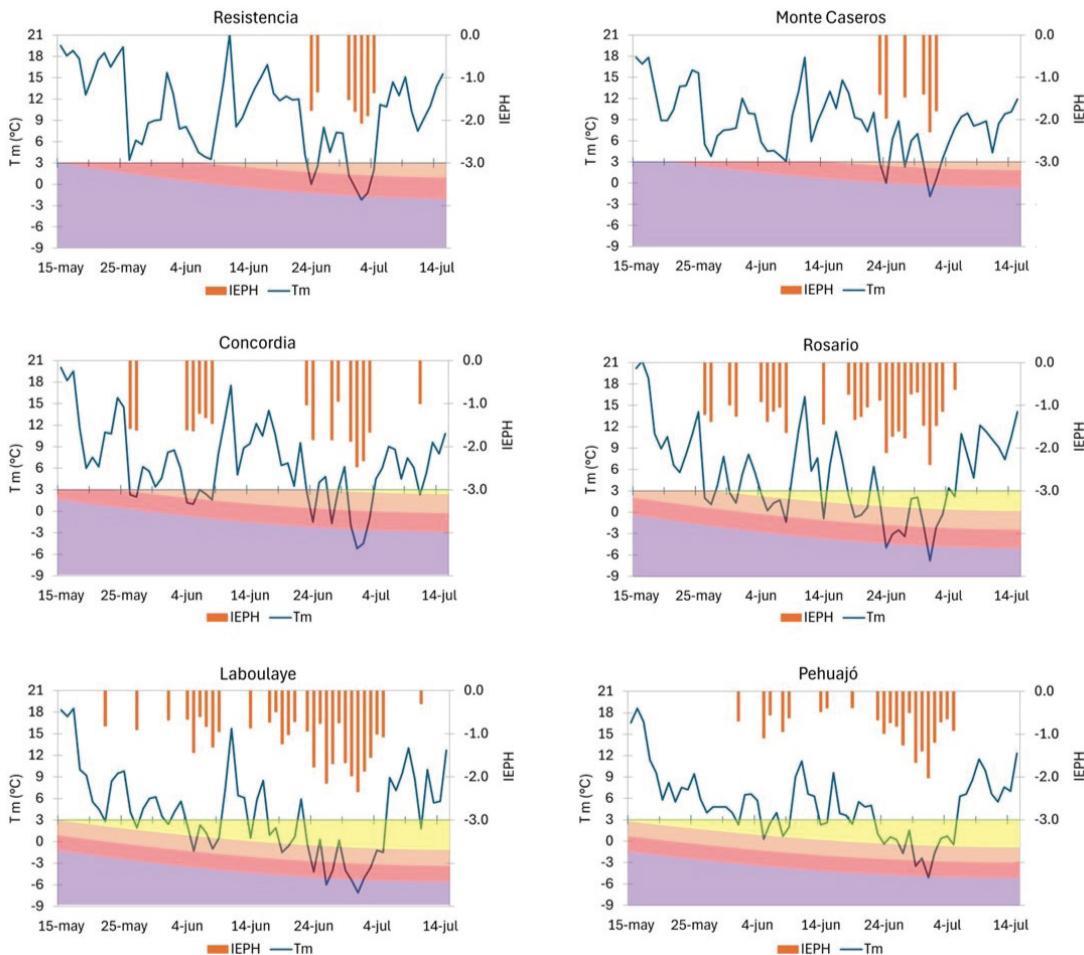


Figura 5. Temperaturas mínimas (T_m) registradas en cada una de las seis localidades entre el 15 de mayo y el 15 de julio de 2025 y valores del Índice Estandarizado de Peligrosidad de Heladas (IEPH). El sombreado de colores para las $T_m < 3^{\circ}\text{C}$ corresponde a las categorías de peligrosidad de la tabla 1 y la figura 4.

con IEPh de -2,48. Este valor indica que a la T_m registrada en esa fecha (-5,2 °C) le corresponde un tiempo de recurrencia de 152 años. En Rosario se registraron -6,8 °C de T_m , correspondiendo un IEPh de -2,4 con 120 años de recurrencia. En Pehuajó ($T_m = -5,1$ °C) y Resistencia ($T_m = -2,2$ °C) se obtuvieron valores similares de IEPh, apenas por debajo de -2, cercanos al límite entre peligrosidad alta y extrema.

Tabla 4. Casos de heladas extremas registrados en cada localidad entre el 1º y 2 julio de 2025, considerando el menor valor del IEPh. Se informa en cada caso la temperatura mínima (T_m) y el tiempo de recurrencia (Tr).

Localidad	Caso extremo			
	Fecha	T_m (°C)	IEPh	Tr (años)
Resistencia	2/7	-2,2	-2,07	53
Mte. Caseros	1/7	-1,9	-2,30	94
Concordia	1/7	-5,2	-2,48	152
Rosario	1/7	-6,8	-2,40	120
Laboulaye	1/7	-7,1	-2,36	108
Pehuajó	1/7	-5,1	-2,03	47

CONCLUSIONES

El IEPh es un índice de gran versatilidad para la clasificación de la severidad de los eventos de heladas, ya que permite la comparación entre distintos eventos ocurridos en diferentes localidades y momentos del año. En este trabajo, se lo aplicó para analizar las heladas agrometeorológicas registradas en seis localidades del centro y este de la Argentina, durante la primera parte de la temporada invernal de 2025. Se identificaron entre 6 y 29 casos de heladas en las distintas localidades. En las ubicadas más al sur hubo mayor cantidad de casos y la mayor proporción fue clasificada como de peligrosidad baja o moderada. En cambio, en las del norte hubo menos casos, pero más de la mitad fue de peligrosidad alta o extrema.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que demuestran la aplicabilidad del IEPh para la clasificación de eventos según niveles de peligrosidad. Esto abre posibilidades de expandir su uso al análisis de riesgos agroclimáticos y seguros agrícolas, como así también a sistemas de alerta, combinándolo con pronósticos de temperaturas mínimas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por los datos brindados.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, M.I. y P. Laporta, 2009. La teoría social del riesgo. Una primera aproximación a la vulnerabilidad social de los productores agropecuarios del Sudoreste bonaerense ante eventos climáticos adversos. Mundo Agrario 10(19).
- Blasón, A.; A. Mollá Kralj y R. Rodríguez, 2018. Índice de Peligrosidad Anual de Heladas (IPAH): Concepto y utilidad. Revista Argentina de Agrometeorología IX: 1-10.
- Burgos, J.J., 1963. Las heladas en la Argentina. Colección Científica del INTA, Buenos Aires. 389 p.
- Carrão, H.; S. Russo, G. Sepulcre-Canto and P. Barbosa, 2016. An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data, Int. J. App. Earth Obs. & Geoinf. 48: 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.011>
- Crimp, S.J.; D. Gobbett, P. Kokic, U. Nidumolu, M. Howden and N. Nicholls, 2016. Recent seasonal and long-term changes in southern Australian frost occurrence. Clim. Change 139:115–128. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1763-5>
- Crofils, C.; E. Gallic and G. Vermandel, 2024. The dynamic effects of weather shocks on agricultural production. J. Environ. Econ. Manag. 130(1): 103078. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2024.103078>
- Dubois, E. and M. Larocque, 2024. Contribution of standardized indexes to understand groundwater level fluctuations in response to meteorological conditions in cold and humid climates. J. Hydrol. 634:131105. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131105>
- Fernández Long, M.E. y I. Barnatán, 2013. Heladas. En: Agrometeorología. Murphy, G. y R. Hurtado (Eds). Ed. Facultad de Agronomía, Buenos Aires. pp 315-342.
- Fernández Long, M.E., G. Murphy y M.K. Torterolo (2008). Índice de riesgo sistémico de heladas (IRISH). Agronomía Tropical 58(1): 65-68.
- Fernández Long M.E.; G. Müller, A. Beltrán-Przekurat and O. Scarpati, 2013. Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. Int J Climatol. 33: 1673–1686. <https://doi.org/10.1002/joc.3541>
- Fernández Long, M.E.; I. Barnatán, C. Dominici y G. Murphy, 2016. Información agroclimática de las heladas en la Argentina: generación y uso. Meteorología 41(2): 7-31.
- García-Martín, A.; L. Paniagua, F. Moral, F. Rebollo and M. Rozas, 2021. Spatiotemporal analysis of the frost regime in the Iberian Peninsula in the context of climate change (1975–2018). Sustainability 13(15):8491. <https://doi.org/10.3390/su13158491>
- Gitz, V. and A. Meybeck, 2012. Risks, vulnerabilities

- and resilience in a context of climate change. En: Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector. Meybeck, A.; J. Lankoski, S. Redfern, N. Azzu & V. Gitz (Eds.). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma. pp 19-36.
- Graczyk, D. and M. Szwed, 2021. Changes in the occurrence of late spring frost in Poland. *Agronomy* 10(11), 1835. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111835>
- Krakauer, N.Y., 2024. It Is Normal: The Probability Distribution of Temperature Extremes. *Climate* 12, 204. <https://doi.org/10.3390/cli12120204>
- Kukal, M.S. and S. Irmak, 2018. U.S. Agro-climate in 20th century: growing degree days, first and last frost, growing season length, and impacts on crop yields. *Sci. Reports* 8, 6977. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25212-2>
- Lamichhane, J.R., 2021. Rising risks of late-spring frosts in a changing climate. *Nature Clim. Change* 11, 554–555. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01090-x>
- Lhomme, J.P. and L. Guillioni, 2004. A simple model for minimum crop temperature forecasting during nocturnal cooling. *Agric. For. Met.* 123(1-2), 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.11.001>
- Li, J.; Z. Wang, X. Wu, J. Zscheischler, S. Guo and X. Chen, 2021. A standardized index for assessing sub-monthly compound dry and hot conditions with application in China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25:1587–1601. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1587-2021>
- Lloyd-Hughes, B. and M. Saunders, 2002. A drought climatology for Europe. *Int. J. Climatol.* 22:1571-1592. <https://doi.org/10.1002/joc.84>
- Müller, G., 2007. Patterns leading to extreme events in Argentina: partial and generalized frosts. *Int. J. Climatol.* 27:1373–1387. <https://doi.org/10.1002/joc.1471>
- Natenzon, C. y D. Ríos, 2015. Riesgos, catástrofes y vulnerabilidades. Aportes desde la Geografía y otras Ciencias Sociales para casos argentinos. Ed. Imago Mundi, Buenos Aires. 228 pp.
- Pascale, A. y E. Damario, 2004. Bioclimatología Agrícola y Agroclimatología. Ed. Facultad de Agronomía, Buenos Aires. 550 pp.
- Serio, L.; P. Martin y G. Murphy, 2010. Evaluación de una metodología de pronóstico estadístico para la condición hídrica del suelo en la región pampeana argentina. *Agriscientia* 27(1):11-17.
- Snyder, R. y P. Melo-Abreu, 2010. Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. Vol. 1. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma. 240 pp.
- Sosa, G.; M.E. Fernández Long y L. Spescha, 2020. Evaluación de tres índices como indicadores de sequía agrícola en la Región Pampeana. *Agronomía & Ambiente* 40(1):16–24.
- Sosa, G.; M.E. Fernández-Long and S.M. Vicente-Serrano, 2025. Evaluating the performance of drought indices for assessing agricultural droughts in Argentina. *Agron. J.* 117:e70008. <https://doi.org/10.1002/agj2.70008>
- Strong, C. and G. McCabe, 2017. Observed variations in U.S. frost timing linked to atmospheric circulation patterns. *Nature Communications* 8:15307.
- Vicente-Serrano, S.M.; S. Beguería and J. López-Moreno, 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Climate* 23(7):1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Xiao, L.; L. Liu, S. Asseng, Y. Xia, L. Tang, B. Liu, W. Cao and Y. Zhu, 2018. Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China. *Agric. For. Met.* 260–261:154-164. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.006>