

EVALUACIÓN DE TRES ÍNDICES COMO INDICADORES DE SEQUÍA AGRÍCOLA EN LA REGIÓN PAMPEANA

Gastón D. Sosa; María E. Fernández Long y Liliana B. Spescha

Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Departamento de Recursos Naturales y Ambiente.
Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Av. San Martín 4453(C1417DSE), Buenos Aires, Argentina.
E-mail: gdsosa@agro.uba.ar

Recibido: 08/10/19

Aceptado: 02/04/20

RESUMEN

La sequía es un fenómeno complejo que afecta a la sociedad y al ambiente, y en particular a los sistemas agrícolas, hídricos y/o socioeconómicos. Constituye una adversidad difícil de evaluar debido a su gran complejidad, ya que depende de múltiples factores. Su caracterización y monitoreo es imprescindible para los productores agrícolas, ya que los rendimientos dependen principalmente del estado hídrico del suelo durante el ciclo del cultivo. Existen diferentes índices para su estimación, cuya performance varía de acuerdo al agroecosistema y a la escala temporal utilizada. Nuestro objetivo fue describir y comparar el desempeño de tres índices para el monitoreo de sequías agrícolas: el SPI (del inglés "Standardized Precipitation Index"), el SPEI (del inglés "Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index") y el ISHi (Índice de Satisfacción Hídrica). Para ello, se analizaron las correlaciones entre los valores mensuales y trimestrales de los índices con los residuos de los rendimientos observados para el maíz para las campañas comprendidas entre 1973/1974 y 2012/2013 en 12 localidades de la Región Pampeana. Los resultados obtenidos indicaron que el índice con mejor comportamiento en las localidades húmedas evaluado mensualmente fue el ISHi; mientras que a una escala trimestral se desempeñaron más satisfactoriamente el SPEI y el SPI. En regiones áridas y con temperaturas altas, cercanas a la isoyeta de 500 mm que limita la producción en seco, se encontró la mayor variabilidad en los índices; y el que representó mejor las condiciones de sequía fue el SPEI. Las correlaciones más altas se encontraron en los meses de diciembre y enero, coincidiendo con el período crítico de definición del rendimiento del maíz en las fechas de siembra habituales en la Región Pampeana.

Palabras clave: Maíz, Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración) e Índice de satisfacción Hídrica (ISHi).

EVALUATION OF THREE INDICES AS AGRICULTURAL DROUGHT INDICATORS IN THE PAMPAS REGION

SUMMARY

Drought is a complex phenomenon affecting society and the environment, especially agricultural, water and / or socioeconomic systems. It constitutes an adversity difficult to assess due to its great complexity and reliance on multiple factors. Their characterization and monitoring are essential for agricultural producers since the yields depend mainly on the hydric state of the soil during the crop cycle. There are different indices for its estimation; however the performance varies according to the agroecosystem and the time scale used. The objective was to describe and compare the performance of three indices for monitoring agricultural droughts: the SPI (Standardized Precipitation Index), the SPEI (Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index) and the ISHi (Water Satisfaction Index). On this aim, were analyzed correlations between the monthly and quarterly values of the indexes with the residuals of the observed maize yields for the campaigns between 1973/1974 and 2012/2013 in 12 sites of the Pam-

pas Region. The results obtained indicated that the index with the best performance in humid localities at the monthly level was the ISHi, and at the quarterly level the SPEI and the SPI. In arid regions having high temperatures, close to the 500 mm isohyet that limits rainfed production, was found the greatest variability in the indices was found and the SPEI was the one best representing the drought conditions. The highest correlations were found in the months of December and January, coinciding with the critical period for defining maize yield on the usual planting dates in the Pampas Region.

Key words: Corn, Standardized Precipitation Index (SPI), SPEI (Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index) and Water Satisfaction Index (ISHi)

INTRODUCCIÓN

La sequía es uno de los eventos naturales más costosos y menos entendidos, dada la dificultad para definir su comienzo y su fin, debido a su lento desarrollo. Entre todos los eventos meteorológicos extremos, es el que posee la mayor duración y la menor predictibilidad (Mishra y Singh, 2010). Este fenómeno ocurre en todas las zonas climáticas, tanto en regiones húmedas como secas, y en cualquier época del año. La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2006) define a la sequía como un fenómeno que se produce a raíz de niveles de precipitación inferiores a lo esperado o a lo normal. Usualmente, se considera únicamente a la precipitación cuando se reconocen y analizan las condiciones de sequía, dado que es el factor principal que controla la formación y persistencia de condiciones de sequía (Lloyd-Hughes y Saunders, 2002). Es importante marcar una diferencia entre sequía y aridez; la primera es temporal, mientras que la segunda es una característica climática de una determinada región.

Las áreas bajo estrés hídrico podrían representar en un cuarto de siglo dos tercios del planeta (Murphy y Spescha, 2011). Por otra parte, el cambio climático también se relaciona con el aumento en varias zonas del globo de la frecuencia e intensidad de eventos extremos, entre ellos las sequías, cuyos daños pueden alcanzar regiones en donde se desarrolla la producción agropecuaria, poniendo en riesgo la estabilidad de las empresas del sector. De hecho, el incremento en la variabilidad de la precipitación es uno de los aspectos más importantes relacionados con el cambio climático (IPCC, 2013). Se ha observado

que el estrés hídrico en el cultivo del maíz en la Región Pampeana se encuentra fuertemente relacionado con dicha variabilidad, dada por el fenómeno de El Niño- Oscilación del Sur (ENOS o ENSO, por sus siglas en inglés), el cual, en los últimos 20 años, ha incrementado su intensidad a causa del cambio climático (Jozami *et al.*, 2018). Es por ello que es de suma importancia contar con modelos que permitan predecir dichas situaciones para poder planificar medidas que mitiguen el impacto de la falta de agua.

En los últimos años, la Argentina ha sufrido tres eventos importantes de sequía, el primero entre los años 2007 y 2009, el segundo entre los años 2011-2012 y el último en 2017-2018. La sequía del periodo 2007-2009 ha sido descrita por Serio y Vich (2010), mientras que la del período 2011-2012 ha sido caracterizada por Ravelo *et al.* (2014). Este autor afirma que debido a la disminución de los rendimientos de soja por la sequía, en el periodo 2007-2009 se han reportado pérdidas por 595 millones de dólares sólo en seis departamentos de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba, mientras que la sequía de 2011-2012 en tres departamentos de Córdoba y Santa Fe causó pérdidas por un total de 455 millones de dólares.

En la Argentina, la agricultura es una de las principales actividades económicas, siendo el maíz uno de los principales cultivos, cuya área sembrada se ubica mayormente en la Región Pampeana y se realiza casi exclusivamente en condiciones de secano (Serio y Vich, 2010). Por lo tanto, sus rendimientos están sujetos principalmente a las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo,

más precisamente durante el período crítico de definición del rendimiento, ubicado en un período de aproximadamente 30 días centrado en la floración (Cárcova *et al.*, 2003). La ocurrencia de un estrés hídrico o lumínico durante este período, afecta significativamente el rendimiento final (Maddonni, 2012). En general, el consumo de agua y crecimiento de los cultivos se ven limitados cuando el contenido hídrico del suelo en la zona de la rizósfera se encuentra por debajo del 40-60 % del agua útil, siendo en floración el período crítico en que la provisión de agua no debe ser limitante (Andrade *et al.*, 1996).

Existen infinidad de índices para el monitoreo y/o clasificación de las sequías, los que difieren entre sí según las variables que son utilizadas para calcularlos (precipitación, evapotranspiración, tipo de suelo, etc.) y las escalas de tiempo en las que operan, entre otros. Estos indicadores se agruparon en los trabajos de Dracup *et al.* (1980), Byun y White (1999), Valiente (2001), Zargar *et al.* (2011) y Penalba y Rivera (2015). Uno de los más utilizados en todo el mundo y también en la Argentina, ya que está determinado por la OMM, es el Índice Estandarizado de Precipitación o SPI, (del inglés "Standardized Precipitation Index"), propuesto por Mc Kee *et al.* (1993), el que relaciona a la precipitación acumulada durante un período de tiempo determinado con la distribución estadística de las precipitaciones históricas registradas en el lugar, y puede obtenerse para diferentes escalas de tiempo (1, 3, 6, 12 y 24 meses). Otros índices utilizados son el ISHi (Índice de Satisfacción Hídrica- Fernández Long *et al.*, 2012), el que está basado en el balance hidrológico del suelo, por lo que puede ser calculado a paso diario; y el SPEI (del inglés "Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index"- Vicente Serrano *et al.*, 2010), de reciente introducción en la Argentina, el que se obtiene a partir de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración. Este índice tiene en cuenta los cambios en la evapotranspiración, presentando las ventajas de

ser sencillo de calcular, y, al igual que el SPI, de poder ser estandarizado y calculado en escalas multitemporales.

Es imprescindible contar con modelos que permitan predecir la ocurrencia e intensidad de las sequías, en particular en cultivos de secano como el maíz. Dado que el valor predictivo de los índices puede variar según el agroecosistema, el objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño de los índices SPI, ISHi y SPEI como indicadores de sequía agrícola en la Región Pampeana. Para ello, se compararon las diferentes correlaciones de las estimaciones obtenidas con los tres índices de sequía agrícola seleccionados con los valores de rendimiento del maíz en doce localidades de la Región Pampeana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar el desempeño de tres índices elegidos (SPI, ISHi y SPEI) como indicadores de sequía agrícola en la Región Pampeana, se compararon las diferentes correlaciones entre las estimaciones de los tres índices con el rendimiento del maíz en diferentes localidades (Cuadro 1). El cultivo elegido para correlacionar los índices fue el maíz, ya que su período crítico para la definición del rendimiento se ubica, según las fechas de siembra habituales en la región pampeana, en los meses de mayor probabilidad de ocurrencia de déficits hídricos: diciembre y enero (Maddonni, 2012).

Los tres índices se evaluaron en forma mensual, mientras que el ISHi y el SPEI se analizaron además en forma trimestral. Para la estimación de los índices, se utilizaron datos meteorológicos diarios del período 1973-2013 de 12 localidades de la Región Pampeana. Los datos de rendimiento observado entre las campañas 1973/1974 y 2012/2013 se extrajeron del Sistema Integrado de Información Agropecuaria, perteneciente a la Secretaría de Agroindustria de la Nación (2019).

En la Argentina varios autores han intentado explicar el efecto de la variabilidad cli-

Cuadro 1. Nombre, ubicación en coordenadas geográficas y altura sobre el nivel del mar (m) de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura s. n. m. (m)
Azul AERO	-36,83	-59,88	147
Barrow INTA	-38,32	-60,25	120
Ceres AERO	-29,88	-61,95	88
General Pico AERO	-35,70	-63,75	145
Gualeduaychú AERO	-33,00	-58,62	21
Laboulaye AERO	-34,13	-63,37	137
Las Breñas INTA	-27,08	-61,12	102
Marcos Juárez INTA	-32,68	-62,12	110
Pehuajó AERO	-35,87	-61,90	87
Pergamino INTA	-33,93	-60,55	65
Río Cuarto AERO	-33,12	-64,23	421
Rosario AERO	-32,92	-60,78	25

mática interanual sobre los rendimientos de los cultivos (Sierra y Brynstein, 1989; Minetti *et al.*, 2002; Hurtado, 2008; Spescha, 2008). En estos análisis se asume que la tendencia creciente de la serie de rendimientos se debió al efecto tecnológico y los residuos de esa tendencia de los rendimientos a la variabilidad climática. Con el objetivo de filtrar los avances tecnológicos y de manejo ocurridos en el período analizado, se utilizó la metodología de los promedios móviles (Fernández Long *et al.*, 2012), los que se calcularon para cinco años de los rendimientos observados. Posteriormente, se determinó la anomalía de los mismos, lo que se conoce como residuos. En el comienzo y el fin de las series de rendimientos, los promedios se realizaron con los cinco primeros y últimos años, de manera de no perder información.

El SPI, cuya condición hídrica resultante se clasifica en distintas categorías, con valores que oscilan entre 2 y -2, se estimó a partir de valores descargados desde el Centro Regional del Clima para el Sur de América de Sur (2019). Para la obtención del ISHi, por su parte, se calculó la evapotranspiración potencial diaria (EP) a través de la metodología de Penman-Monteith recomendada por la FAO (Allen *et al.*, 1998). La evapotranspiración real dia-

ria (ER) se obtuvo como variable de salida del programa BHOA -Balance Hidrológico Operativo para el Agro- (Fernández Long *et al.*, 2012).

El ISHi fue calculado para cada mes como:

$$ISHI = \frac{\sum^n \frac{ERd}{EPd}}{n}$$

Donde:

ER_d: evapotranspiración real diaria

EP_d: evapotranspiración potencial diaria

n: número de días del mes considerado (28, 29, 30 o 31).

El SPEI se determinó a partir de la evapotranspiración estimada mediante los métodos de Penman (de ahora en adelante, -SPEI-PEN) (Beguería *et al.*, 2019a) y de Thornthwaite (de ahora en adelante, -SPEI-TH) (Beguería *et al.*, 2019b).

Para evaluar el desempeño de los índices, se compararon en forma visual las correlaciones entre los valores mensuales (de octubre a marzo) estimados para los distintos índices de sequía elegidos con los residuos de los rendimientos de maíz para las campañas com-

prendidas entre 1973/1974 y 2012/2013 en las localidades de Azul, Barrow, Ceres, General Pico, Gualeguaychú, Laboulaye, Las Breñas, Marcos Juárez, Pehuajó, Pergamino, Río Cuarto y Rosario. Las correlaciones se efectuaron mediante la metodología de Pearson y se analizó la significancia estadística de las correlaciones al 99% (Snedecor y Cochran, 1980). Se realizó un análisis del comportamiento de los índices en los meses con los resultados más representativos (diciembre, enero y febrero), y luego uno general de todos los índices en todas las localidades. En los gráficos, el límite de significancia al 99% está señalado en $r=0,42$ en línea negra continua. Los puntos ubicados por encima de la misma describen correlaciones significativas al 99%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación los índices elegidos como indicadores de sequía mediante el análisis de la significancia y de sus correlaciones con el rendimiento del maíz mostró en general que los índices presentan diferencias en su desempeño según la localidad, el o los meses del año analizados, y la escala temporal utilizada para el análisis (mensual o trimestral). Por ejemplo, todos índices de paso mensual para el mes de diciembre (Figura 1a) para la localidad de Azul presentaron correlaciones significativas al 99%, siendo el SPEI-PEN el que alcanzó el máximo valor ($r=0,56$). Por el contrario, Barrow, General Pico y Las Breñas no mostraron para ninguno de los índices correlaciones significativas. En Ceres, sólo el ISHi las mostró, con un valor de $r=0,50$. Para Gualeguaychú, todos los índices presentaron correlaciones significativas, con muy poca diferencia entre ellos, siendo el SPEI-TH el de máximo valor ($r=0,60$). En Laboulaye, sólo el ISHi no logró correlaciones significativas; el SPEI-TH fue el que alcanzó el mayor valor ($r=0,53$), seguido apenas por el SPI ($r=0,51$). Por otro lado, en Marcos Juárez y en Pergamino todos los índices mostraron correlaciones significativas con valores de r superiores al

resto de las demás localidades. En la primera, el SPEI-PEN alcanzó un valor de $r=0,63$, el SPEI-TH $r=0,61$ y el SPI $r=0,58$, mientras que en la segunda se lograron coeficientes un poco más altos: SPEI-TH e ISHi $r=0,67$, SPEI-PEN $r=0,66$ y SPI $r=0,57$. Por último, en Pehuajó y en Rosario sólo el SPEI-TH alcanzó correlaciones significativas, con valores de $r=0,44$ y $r=0,51$, respectivamente.

Evaluando el comportamiento de los índices de paso mensual para el mes de enero (Figura 1b), se observó que sólo en las localidades de Azul y Laboulaye se obtuvieron correlaciones significativas al 99% para todos los índices, siendo el ISHi el que alcanzó el máximo valor en ambas: $r=0,66$ y $r=0,58$, respectivamente. Ceres y Rosario, por el contrario, no presentaron para ninguno de los índices correlaciones significativas. En Barrow, sólo el SPEI-PEN se ubicó por encima de la línea de significancia, con un valor de $r=0,46$. Para el resto de las localidades, sólo el ISHi alcanzó correlaciones significativas; los mayores valores de correlación se lograron, al igual que en diciembre, en Marcos Juárez ($r=0,68$) y en Pergamino ($r=0,69$).

El análisis de los índices de paso mensual en el mes de febrero (Figura 1c) arrojó que no se obtuvieron correlaciones significativas para el SPEI-TH, el SPEI-PEN y el SPI en ninguna de las localidades. Sólo el ISHi presentó correlaciones significativas en cinco de las doce localidades, alcanzando su valor máximo en Azul ($r=0,65$). Por otra parte, analizando el comportamiento de los índices de paso trimestral en el mes de diciembre (Figura 1d), se observa que las localidades de Azul, Barrow, General Pico, Laboulaye y Las Breñas no mostraron correlaciones significativas para ninguno de los índices. Por el contrario, en Marcos Juárez, Pergamino y Río Cuarto todos los índices presentaron correlaciones significativas, con muy poca diferencia entre ellos. Tanto en Marcos Juárez y en Río Cuarto, el SPEI-PEN fue el que alcanzó el valor más alto ($r=0,57$ y $r=0,59$, respectivamente), apenas por encima de los demás índices. En Pergamino,



Figura 1. Correlaciones entre las estimaciones de los diferentes índices de sequía (SPEI-TH, SPEI-PEN, SPI y ISHi) y el rendimiento del cultivo de maíz para las diferentes localidades de la Región Pampeana. Se muestran los valores *r* de las correlaciones de Pearson entre los residuos del rendimiento del maíz y las estimaciones de los diferentes índices para cada localidad. En el panel izquierdo se muestran las correlaciones entre los índices de paso mensual y los meses de diciembre (a), enero (b) y febrero (c). En el panel derecho pueden observarse las correlaciones entre los índices de paso trimestral en los meses de diciembre (d), enero (e) y febrero (f). Los puntos ubicados sobre la línea negra (*r*=0,42) describen correlaciones significativas al 99%.

tanto el SPI como el SPEI-TH alcanzaron coeficientes de *r*=0,69, superando al SPEI-PEN, cuyo valor de *r* fue de 0,67.

En el mes de febrero (Figura 1f), las correlaciones más altas para los índices trimestrales SPEI-PEN y SPI se observaron en la localidad de Azul, con valores de *r*=0,73 y *r*=0,69, respectivamente. El SPEI-TH alcanzó sus valores máximos en Pehuajó

(*r*=0,57) y Pergamino (*r*=0,56), ubicándose muy por debajo de los resultados alcanzados en Azul.

Relación entre los índices y las localidades

En las localidades situadas al oeste de la Región Pampeana como Laboulaye, Río Cuarto y General Pico, las que se ubican cerca de la isoyeta de 500 mm, la que limita el área de

agricultura de secano, la variabilidad en los resultados fue mayor, principalmente en los índices de paso mensual. Esta variabilidad estaría dada por la dispersión en las fechas de siembra de esta zona (Fernández Long *et al.*, 2012.; Carnelos *et al.*, 2014), la cual se ve modificada año tras año en función de la disponibilidad de agua en el suelo, evitando de esta forma el estrés hídrico en el período crítico. Los mejores resultados se obtuvieron en esta zona con el ISHi, el que presentó correlaciones significativas en al menos un mes en todas las localidades, alcanzando los valores máximos en Laboulaye. En los índices de paso trimestral, la variabilidad fue menor ya que todos los índices siguieron el mismo patrón, coincidiendo también en los momentos de los valores máximos, los cuales se dieron en el mes de enero. El SPEI-TH logró los valores más altos, apenas por encima de los otros dos índices. Al igual que en los índices de paso mensual, los mejores resultados se dan en Laboulaye.

En las localidades ubicadas en el centro de la Región Pampeana como Pergamino, Gualagaychú, Pehuajó, Marcos Juárez y Rosario, se alcanzaron los valores de correlación más altos, principalmente en Pergamino. En los índices de paso mensual, el índice que mejores resultados presentó fue el ISHi, con máximos en los meses de diciembre y enero. Los demás índices se ubicaron por debajo de éste, existiendo poca diferencia entre ellos. Los valores más bajos se obtuvieron en la localidad de Rosario. Para los índices de paso trimestral, y al igual que lo descrito en la zona oeste, la variabilidad entre los índices fue menor, y el índice que mejores resultados presentó fue el SPEI-TH.

En las localidades ubicadas al sur de la Región Pampeana, como Azul y Barrow, los mejores resultados se obtuvieron en la primera localidad. Para los índices de paso mensual, también fue el ISHi el que logró mayores valores de correlación, con bastante diferencia respecto a los demás índices. Los valores más

altos se dieron en los meses de enero y febrero, lo cual se corresponde con siembras más tardías, ya que en esta zona la temperatura es una limitante. Para los índices de paso trimestral, el índice que presentó mayores valores de correlación fue el SPEI-PEN, seguido por el SPI. Al igual que en los índices de paso mensual, los máximos se lograron en los meses de enero y febrero.

En las localidades de la zona norte de la Región Pampeana (Las Breñas y Ceres) se observaron los valores de correlación más bajos, y con diferencias entre localidades. Para los índices de paso mensual, en Las Breñas, el ISHi es el que presentó correlaciones significativas sólo en el mes de enero. Para Ceres, los máximos se dieron en el mes de noviembre. En los índices de paso trimestral, Las Breñas obtuvo los valores máximos en el mes de febrero, mientras que en Ceres los logró en diciembre, con muy poca diferencia entre los índices para ambas localidades. Esta diferencia podría deberse a que en Ceres se realiza maíz de primera con altos rendimientos (4100 k ha^{-1} promedio en el período analizado) y en Las Breñas se siembra más tarde, con rendimientos más bajos (2600 k ha^{-1}), ya que la temperatura no es limitante en esta zona.

En todas las localidades se observa que las mayores correlaciones se presentaron en los meses de diciembre, enero y febrero, lo que se corresponde con el período crítico para la definición del rendimiento del maíz en las fechas de siembra habituales en la Región Pampeana. Los mejores resultados para los índices de paso mensual se obtuvieron con el ISHi; coincidentemente con los encontrados por Carnelos *et al.* (2014). Los índices de paso trimestral, por su parte, no presentaron grandes diferencias entre ellos, destacándose el SPEI-TH apenas por encima del SPEI-PEN y del SPI. El buen comportamiento del SPEI como índice de sequía meteorológica fue relevado en la región de Córdoba por Bocco y Vinocur (2016); mientras que los resultados del SPI son consistentes con los en-

contrados por diversos autores, entre ellos Serio y Vich (2010), Ravelo *et al.* (2014), y Skansi *et al.* (2009), quienes han comprobado su utilidad para evaluar sequías en la Región Pampeana.

CONCLUSIONES

En función de los análisis realizados, se puede concluir en que el ISHi resulta la mejor alternativa para evaluar mensualmente sequías agrícolas en la Región Pampeana, mientras que el SPEI-TH lo es para los índices trimestrales; en la medida de que se dispongan de todos los datos para calcularlo. Si no se cuentan con estos datos, el SPI trimestral también es una buena opción, cuya información está al alcance del productor.

En las localidades húmedas, el uso del SPEI como índice de sequía da resultados si-

milares a los obtenidos con el SPI. Sin embargo, en las regiones con clima árido y temperaturas altas, el SPEI podría representar mejor las condiciones de sequía, ya que la ETP en dichas regiones juega un rol importante, acentuando en consecuencia la magnitud estimada de los períodos secos. El SPEI mostró, en general, mejores correlaciones con las diferentes variables durante el período estival, momento en el que se registran los principales impactos de las sequías y cuando el seguimiento de los distintos índices elegidos resulta crítico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto UBACYT 2018 MOD I 20620170100012BA.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R., Pereira, L.S., Raes D., y Smith, M. (1998). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Cuadernos de riego y drenaje Nº 56. Roma, Italia: FAO.
- Andrade, F. H., Cirilo, A., Uhart, S., y Otegui, M. E. (1996). *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Balcarce, Argentina: Editorial La Barrosa.
- Beguería, S., Latorre, B., Reig, F. y Vicente Serrano, S. (2019). *Global SPEI database*. Recuperado de <https://spei.csic.es/database.html>
- Beguería, S., Latorre, B., Reig, F. y Vicente Serrano, S. (2019). *SPEI Global Drought Monitor*. Recuperado de <https://spei.csic.es/map/maps.html#months=1#month=7#year=2019>.
- Bocco, A., y Vinocur, M. G. (2016). Análisis del comportamiento de las sequías en el sur de Córdoba utilizando los índices SPI y SPEI. *Actas XVI Reunión Argentina y VIII Latinoamericana de Agrometeorología*. Puerto Madryn, Argentina: Asociación Argentina de Agrometeorología.
- Byun, H.R., y Wilhite, D. A. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12, 2747-2756.
- Cárcova, J., Borrás, L., y Otegui, M. E. (2003). Ciclo Ontogénico, Dinámica del Desarrollo y Generación del Rendimiento y la Calidad en Maíz. En: Satorre, E. H., Benech Arnold, R. L., Slafer, G. A., de la Fuente, E. B., Miralles, D. J., Otegui M. E. y Savin, R. (eds.): *Producción de Granos, bases funcionales para su manejo* (pp 133-163). Buenos Aires, Argentina: Editorial Facultad de Agronomía.
- Carnelos, D.A., Fernández Long, M. E., y Murphy, G.M. (2014). Índice de satisfacción hídrica como estimador de rendimientos de maíz. *Revista Agronomía y Ambiente*, 34 (1-2), 1-16.
- Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur. (2019). *Monitoreo de Sequías y excesos de precipitación. Series*. Recuperado de http://www.crc-sas.org/es/monitoreo_sequias.php.
- Dracup, J. A., Lee K. S., y Paulson, E. G. (1980). On the statistical characteristics of drought events. *Water Resources Research*, 16, 289-296.
- Fernández Long, M.E., Spescha, L.B., Barnatán I., y Murphy, G.M. (2012). Modelo de Balance Hidrológico Operativo para el Agro (BHOA). *Revista Agronomía & Ambiente*, 32 (1-2), 31-47.

- Hurtado, R. H. (2008). *Relación entre el rendimiento del cultivo de trigo y el almacenaje estimado de agua en el suelo, en las cinco provincias pampeanas*. (Tesis de Maestría). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Jozami, E., Montero Bulacio, E., y Coronel, A. (2018). Temporal variability of ENSO effects on corn yield at the central region of Argentina. *International Journal of Climatology* 38, 1-12.
- Lloyd-Hughes, B. y Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22, 1571-1592.
- Maddonni, G. A. (2012). Analysis of the climatic constraints to Maize production in the current agricultural region of Argentina- a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 325-345.
- McKee, T.B., Doesken, N. J., y Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints 8th Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, 179-184.
- Minetti, J. L., Vargas, W. M., Vega, B., y Costa, M. C. (2002). Las sequías en La Pampa Húmeda. Su impacto en la productividad del maíz. *Actas IX Reunión Argentina de Agrometeorología*, 67-68.
- Mishra, A. K., y Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
- Murphy, G. M., y Spescha, L. B. (2011). Adversidades climáticas XVIII.2 Sequías. En: Murphy, G. M. y Hurtado, R. H. (eds): *Agrometeorología* (pp 343-356). Buenos Aires, Argentina: Editorial Facultad de Agronomía.
- Organización Meteorológica Mundial, (2006). Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros. *Información meteorológica y climática para el desarrollo agrícola sostenible*, 1006, 6-8.
- Penalba, O. C. y Rivera, J.A. (2015). Comparación de seis índices para el monitoreo de sequías en el sur de Sudamérica. *Meteorológica*, 40 (2) ,33-57.
- Ravelo, A. C., Zanvettor, R. E. y Boletta, P. E. C. (2014). Atlas de sequías de la República Argentina. Córdoba, Argentina: CREA- UNC-CONICET.
- Secretaría de Agroindustria. (2019). *Cultivo de maíz, rendimientos departamentales*. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. Recuperado de <https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>.
- Serio, L., y Vich, H. (2010). Algunas características e impactos de las sequías que afectaron a la región pampeana entre 2007 y 2009. *Revista Facultad de Agronomía*, 30 (3), 187-195.
- Skansi, M., Núñez, S. E., Podestá, G. P., Veiga, H. y Garay, N. (2009). La sequía del año 2008 en la región húmeda Argentina descripta a través del Índice de Precipitación Estandarizado. *XIII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología y X Congreso Argentino de Meteorología*.
- Sierra, E. M. y Brynsztein, S. M. (1989). Wheat yield variability in the SE of the province of Buenos Aires. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49, 1-10.
- Snedecor, G. W., y Cochran, W. G. (1980). Statistical methods. Iowa, Estados Unidos: *The Iowa State University Press*.
- Spescha, L. B. (2008). *Relación entre los rendimientos de soja y el almacenaje del agua en el suelo en la Región Pampeana* (Tesis de maestría). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Valiente, O. M. (2001). Sequías: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59-80.
- Vicente Serrano, M. S., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23 (7), 1696-1718.
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B. y Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19, 333-349.