

PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO EN GRANO DE TRIGO EN LA REGIÓN SUBHÚMEDA-SECA PAMPEANA EN BASE A DIFERENTES ÍNDICES CLIMÁTICOS

WHEAT GRAIN YIELD PREDICTION IN THE SUB-HUMID DRY PAMPEAN REGION BASED ON DIFFERENT WEATHER INDICES

Fernández, Miguel Angel^{1*}

Recibido 12/02/2019
Aceptado 21/06/2019

RESUMEN

El trigo pan es el cultivo de invierno más importante en la región sub-húmeda seca pampeana, pero presenta gran variabilidad interanual en el rendimiento en grano. El objetivo fue predecir el rendimiento en grano y la respuesta al agregado de fertilizante nitrogenado, en base a diferentes índices climáticos del otoño previo a la siembra. Los ensayos se realizaron en la Facultad de Agronomía de la UNLPam (36° 32' 49" S, 64° 18' 20" W) durante un período de 22 años. Al tratamiento fertilizado se le agregó 100 kg.ha⁻¹ de urea al voleo en macollaje temprano. Se utilizaron para la predicción los siguientes índices climáticos: ONI (Ocean Niño Index), MEI (Multivariate ENSO Index), TSM Zona 6.1 (Temperatura Superficial del Mar) y TSA (Tropical South Atlantic). No hubo una clara asociación de los índices MEI y ONI durante el otoño previo con el rendimiento en grano de trigo pan, ni con la respuesta a la fertilización con nitrógeno. Sin embargo, hubo una relación inversa ($y = -2320x + 50507$; $R^2 = 0,25$; $P=0,017$) entre el índice TSM Zona 6.1 del Océano Atlántico (5° y 25°S; 0° y 20°W) del mes de marzo con el rendimiento en grano y también con la respuesta al agregado de fertilizante ($y = -769,4x + 16117$; $R^2 = 0,24$; $P = 0,02$). Esto podría incorporarse en los modelos de decisión previos al inicio de la campaña de trigo para estimar los rendimientos alcanzables y mejorar además los modelos de respuesta a la fertilización nitrogenada en la región.

PALABRAS CLAVE: *Triticum aestivum*; predicción; rendimiento; respuesta nitrógeno

ABSTRACT

The bread wheat is the most important winter crop in the sub-humid dry Pampa region, but it has great interannual variability in grain yield. The objective this work was to predict the grain yield and the response to the aggregate of nitrogen fertilizer, based on different climate indices in the autumn prior to sowing. The trials were performed for a period of 22 years in the Agronomy Faculty of the UNLPam (36° 32' 49" S; 64° 18' 20" W). The fertilized treatment was added 100 kg.ha⁻¹ of broadcast urea in early tillering. Climatic indexes were used for prediction; ONI (Ocean Child index), MEI (multivariate ENSO index) and TSA (Tropical South Atlantic). The MEI index of March-April and the ONI index of February-March-April did not explain the grain yield. There was a negative relationship between the SST index (sea surface temperature) of March in zone 6.1 of the Atlantic Ocean (5° and 25° S, 0° and 20° W) with the grain yield and also with the response to the fertilizer aggregate. As the index increased, the grain yield and response to the aggregate of fertilizer decreased. This could be incorporated in the decision models prior of the sowing of wheat to estimate the achievable yields and also to improve the models of response to nitrogen fertilization in the region.

KEY WORDS: *Triticum aestivum*; prediction; yield; nitrogen response

INTRODUCCIÓN

El trigo pan (*Triticum aestivum* L.) es un cultivo muy importante en la producción

agropecuaria de la región sub-húmeda seca pampeana, pero los rendimientos presentan gran variabilidad interanual con rendimientos promedio mínimos de 989 kg.ha⁻¹ en el año 2009, y máximos de 2830 kg.ha⁻¹ en 2016 (MAGyP, 2019). La región fue descrita como subhúmeda-seca para el cultivo de trigo, sobre

Cómo citar este trabajo:

Fernández, M. A. (2019). Predicción del rendimiento en grano de trigo en la región subhúmeda-seca pampeana en base a diferentes índices climáticos. *Semiárida*, 29(2), 61-72.

¹ Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Agronomía. Santa Rosa, Argentina.
* mfernandez@agro.unlpam.edu.ar



la base de la humedad disponible en el período crítico (deficiencia hídrica entre -1 y -25 mm alrededor de la espigazón) (Pascale & Damario, 2004). La región de estudio está en el límite entre la región templada sub-húmeda y la fría sub-húmeda, de acuerdo a la clasificación climática desarrollada específicamente para la Región Pampeana por Díaz y Mormeneo (2002). Sin embargo si se considera la propuesta por Aliaga et al., (2017) se ubicaría en la templada sub-húmeda. Este déficit hídrico durante gran parte del ciclo provoca, principalmente, una disminución en la capacidad de captura de radiación por la canopia del cultivo, que determina una menor producción de biomasa y en consecuencia un menor rendimiento en grano (Fernández, 2013). En el cultivo de trigo existe un período crítico (PC) en la definición del rendimiento en grano, que varía según los investigadores, pero en general se puede ubicar 30 días antes de floración (Fischer, 1985; Dhillon & Ortiz-Monasterio, 1993). En esta región el PC coincide aproximadamente con el mes de octubre (Fernández, 2013) y las lluvias ocurridas dentro de este período, tuvieron una relación significativa con el rendimiento en grano (Fernández & Zingaretti, 2015).

Por otro lado, la existencia de ciclos naturales en la atmósfera afecta el régimen pluviométrico en la región durante semanas, meses y décadas. Es así que la temperatura superficial en los trópicos de los Océanos Pacífico y Atlántico, constituyen el principal factor que determina la variabilidad de las precipitaciones en esta región, con el Pacífico dominando la escala interanual y el Atlántico dominando a una escala de tiempo más larga (Seager et al., 2010; Lovino et al., 2018).

El fenómeno más estudiado es El Niño Oscilación Sur (ENOS: ENSO, sigla en inglés), que posee dos fases: El Niño y La Niña. El fenómeno denominado “El Niño” consiste en un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial Central y Oriental, mientras que La Niña se asocia a una baja en dichas temperaturas (Heinzenknecht, 2011). Ambos fenómenos tienen consecuencias variadas en todo el mundo. En la región templada sub-húmeda pampeana se

observan mayores coincidencias entre las máximas precipitaciones y los eventos El Niño (Aliaga et al., 2017).

En Sudamérica, las oscilaciones interanuales de las precipitaciones se deben principalmente a la variabilidad que existe en la primavera, el verano y el otoño. El verano es la temporada de máximas lluvias en la mayor parte del continente y a su vez la estación de mayor influencia del ENOS en el cono sur (Grimm, 2011).

Podestá et al., (2002) encontraron una relación entre las anomalías de las precipitaciones y las fases ENOS para el trimestre de octubre a diciembre (primavera) en la Región Pampeana. Las fases cálidas están relacionadas con un aumento en las precipitaciones medias, mientras que las fases frías, se relacionan con precipitaciones por debajo de lo normal. Además, durante los eventos El Niño, se observa un rango de variación mayor que durante los eventos La Niña. Además existen lapsos denominados “neutrales” en los que no se registra ninguna de estas fases extremas, ya que las temperaturas del agua en el Pacífico Ecuatorial Central oscilan dentro de márgenes medios.

Para estudiar este fenómeno se han elaborado diversos índices, uno de ellos, el índice ONI (Ocean Niño Index), desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Estados Unidos), que identifica eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) en el Océano Pacífico Tropical (Yu & Kim, 2013). Otro determinante del estado del ENOS es el Índice Multivariado del ENSO (MEI), un indicador más integral del estado mar - atmósfera durante un evento El Niño o La Niña (Wolter & Timlin, 1998).

Existen varios trabajos que evaluaron el efecto del fenómeno ENOS sobre la producción de los cultivos en esta región con resultados contrapuestos.

En los departamentos del noreste de provincia de La Pampa Heinzenknecht (2011) mediante el índice MEI del bimestre octubre-noviembre, que consideró la estación del año más relacionada con el periodo crítico del cultivo, observó una relación entre el rendimiento en grano del

cultivo de trigo y los años Niño, donde los rendimientos fueron menores o iguales a la media general. En cambio, los años Niña, se relacionaron, en general, con rendimientos mayores; excepto en el dpto. Capital en que no hubo una relación clara. Otros autores informaron sobre los efectos positivos del Niño en los rendimientos de trigo en el sur de Argentina y los negativos de la Niña en el norte del país (Travasso et al., 2003). Por su parte, Iizumi et al. (2014) mostraron que en ambas fases del ENOS hubo tanto efectos positivos como negativos sobre los rendimientos de trigo en Argentina, pero en el balance general durante los eventos Niño se elevó la producción un 11,1%, a menudo asociado con condiciones más frías y húmedas. Sin embargo, Pol & Binyamin (2014) indicaron que con el evento Niño se producen mayores precipitaciones en la región pampeana, pero muchas veces el rendimiento disminuye a causa de enfermedades e inundaciones. Por el contrario, Anderson et al. (2016) encontraron una influencia significativa sobre el rendimiento durante eventos La Niña en el trimestre septiembre, octubre y noviembre y no observó relación con el evento Niño. Otros autores, concluyeron que en zonas del oeste de la región pampeana el trigo no fue afectado por el fenómeno ENOS (Aramburu Merlos et al., 2015).

Barros et al. (2000) mostraron que la tendencia de precipitación anual positiva puede atribuirse, en parte, a los cambios en la frecuencia e intensidad de las fases del ENOS. La ocurrencia de lluvias intensas se da en períodos cortos de tiempo, con mayor frecuencia entre los 30 y 40° de latitud Sur. Además los autores observaron que En la Región Pampeana la contribución más importante a la variación anual de las precipitaciones proviene de la variabilidad en el otoño y en menor medida en el verano.

En la región sur y sudoeste pampeana la señal del Niño se observa desde los meses de Agosto a Abril. Penalba & Rivera, (2016) encontraron que en los meses de julio a septiembre hubo una anomalía significativa que indica una fuerte estacionalidad asociada a la ocurrencia de La Niña mientras que en los demás meses no se

observa una clara tendencia.

Otro fenómeno con influencia en esta región, es el Dipolo del Atlántico Sur caracterizado por una fase positiva definida como el calentamiento de la zona noreste y el enfriamiento de la zona sudoeste del Atlántico tropical sur. Al tener este dipolo una periodicidad de aproximadamente 7-8 meses, es capaz de influenciar la variabilidad de las precipitaciones interanuales en Sudamérica (Enfield et al., 1999; Nnamchi et al., 2011). Sin embargo, Andreoli & Kayano (2004) encontraron un funcionamiento errático del Dipolo ya que TNA (Tropical North Atlantic) y TSA (Tropical South Atlantic) se desacoplan en muchos períodos.

En la década del 30' en la región central de Argentina se produjo una gran sequía que fue asociada a una anomalía caliente en el Atlántico tropical (Seager et al., 2010; Tripaldi et al., 2013); por el contrario, una anomalía fría en el Atlántico tropical hubiera producido un aumento de las precipitaciones (Seager et al., 2010). La influencia de este dipolo fue confirmada Posteriormente por Nnamchi et al. (2017).

La variabilidad de las precipitaciones el noreste de Brasil fue detectada por Andreoli & Kayano (2006) mediante el índice TSA. Posteriormente, Kayano et al. (2009) utilizando el mismo índice determinaron una relación significativa con las lluvias en la Argentina, aproximadamente entre la latitud de 22°S y 38°S, que incluye la zona estudiada en este trabajo. Sin embargo, Flantua et al. (2016) mostraron una escasa relación entre TSA y las precipitaciones en la región de estudio, pero observaron una relación negativa más al sur, en la Patagonia central.

La combinación de la Oscilación Multidecadal del Atlántico en fase positiva y la Oscilación Decadal del Pacífico en fase negativa, producen que las precipitaciones permanezcan escasas y por lo tanto, cuando se da esta combinación la región Pampeana está en riesgo de sequía (Pérez et al., 2015). Esta situación puede provocar que el sistema de producción agrícola supere la capacidad de carga del ambiente y conlleve a la disminución de la producción y la degradación ambiental (Viglizzo et al., 2011).

En Australia, Asseng et al. (2012) encontraron beneficios en la utilización de los pronósticos climáticos ya que se lograron aumentos en los márgenes económicos de los sistemas de producción injvolucrados. También en Paraguay, Ramirez-Rodriguez et al. (2014) encontraron mayor rendimiento de trigo en años Niña y neutrales y propusieron un manejo de la fertilización nitrogenada de acuerdo a pronósticos ENSO. En este contexto, es importante entonces considerar los pronósticos climáticos, ya que permitirían mejorar la predicción de la respuesta al agregado de fertilizantes, con la consecuente disminución de costos y de la contaminación. Es poco lo que se sabe sobre el efecto de estos fenómenos climáticos en la región, y sobre todo en los sistemas de producción de trigo, por ello el presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

a) Evaluar el rendimiento de grano ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y su variación interanual en relación a los efectos de los fenómenos ENOS y TSA en la región subhúmeda seca pampeana.

b) Evaluar efecto del fenómeno ENOS sobre la respuesta del rendimiento de grano al agregado de fertilizante nitrogenado en macollaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción experimental y manejo agronómico

Los ensayos fueron realizados en el Campo Experimental de la Facultad de Agronomía de la UNLPam., ubicado en $36^{\circ} 32' 49''$ S y $64^{\circ} 18' 20''$ W, a 210 msnm, durante el período 1996 a 2017.

El suelo del lote utilizado es un Paleustol petrocálcico (Soil Survey Staff, 2014), con 10% arcilla, 25% de limo y 65% de arena, con escasa pendiente superficial y un manto de tosca en el subsuelo, a una profundidad que varió entre 0,8 y 1,0 metro. Los parámetros del suelo (promedio de todos los años evaluados) al momento de la siembra fueron: materia orgánica; $1,35\% \pm 0,3$; fósforo disponible (Bray I); $11,6 \text{ ppm} \pm 2,5$ y nitrógeno de nitratos: de 0 a 30 cm de profundidad $10,8 \text{ ppm} \pm 5,3$ y de 30 a 60 cm de profundidad $6,5 \text{ ppm} \pm 2,3$.

La variedad de trigo que se utilizó, durante los 22 años de ensayos, fue Buck Guaraní, de ciclo intermedio a corto inscripta en la CONASE (Comisión Nacional de Semillas) en 1994, de porte semi-erecto, altura total de 80 cm, muy resistente a frío en estado vegetativopasto, con grano ovalado, peso hectolítrico potencial de $82 \text{ kg}\cdot\text{hl}^{-1}$ y peso potencial del grano de 38 mg. La fecha de siembra osciló entre el 29 de junio y 14 de julio, dependiendo de la posibilidad operativa de la misma. La densidad de siembra fue de 250 semillas viables por metro cuadrado. La cama de siembra fue en sistema convencional con barbecho previo, generalmente iniciado a principios de marzo y luego mantenido con labores mecánicas de repaso. El cultivo antecesor siempre fue una pastura asociada de entre alfalfa (*Medicago sativa* L.) y festuca (*Festuca arundinacea* Schreb.) o cebadilla criolla (*Bromus catharticus* Vahl.), según el año.

El diseño experimental fue en bloques completamente aleatorizados, con cuatro réplicas de cada tratamiento en parcelas estándar de 6 m de largo x 1,4 m de ancho; con 7 surcos separados a 0,20 metros entre ellos.

La fertilidad del suelo fue modificada con un "arrancador" en todas las parcelas mediante el agregado de $70 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de superfosfato simple a la siembra (N-P-K= 0 - 21 - 0). Al tratamiento denominado "fertilizado" se le agregó $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de urea al voleo en macollaje temprano (Z14-21, Zadoks et al., 1974). El control de las malezas fue realizado con herbicidas en el estado Z14 con una combinación de los herbicidas Metsulfurón Metil ($6 \text{ g i.a.}\cdot\text{ha}^{-1}$) y Dicamba ($100 \text{ cm}^3 \text{ i.a.}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Mediciones en el cultivo

Rendimiento de grano. Se determinó trillando un metro cuadrado del cultivo (3 surcos x 1,67 metros de largo). Las muestras de grano obtenidas fueron llevadas a peso constante en estufa de circulación forzada a 60°C durante 48 horas. El rendimiento se expresó en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ a una humedad del grano de 14%.

Índices climáticos

a) ONI (Ocean Niño Index): desarrollado por la National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA, Estados Unidos), durante los 50 años

estudiados se observaron distintas respuestas entre las subregiones y permite identificar eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) en el Océano Pacífico Tropical. Se obtiene a partir de la media móvil de tres meses de la anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) para la región El Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W). Los eventos cálidos se producen con el desarrollo de una anomalía positiva de la TSM ($> +0,5^{\circ}\text{C}$), mientras fríos se definen por la ocurrencia de una anomalía negativa ($< -0,5^{\circ}\text{C}$) (Yu & Kim, 2013).

b) MEI: El Índice Multivariado del ENOS es un indicador que integra el estado del mar y la atmósfera en la región del Niño 3. A los valores de MEI estandarizados se les adjudica un “rango” que va desde 1 hasta 62. El “valor 1” identifica al estado La Niña más intenso del que se ha tenido registro; en el otro extremo, el “valor 62” corresponde al evento El Niño más intenso conocido. A partir de este rango se sugieren dos tipos de clasificación, a saber: 1 - 18 La Niña; 19 - 44 Neutro y 45 - 62 El Niño.

c) TSA: El Índice Tropical South Atlantic Index es un indicador de la anomalía del promedio mensual de la temperatura superficial del mar en el sector comprendido entre Ecuador-20°S y 10°E-30°W cercano al golfo de Guinea (Enfield et al., 1999). La ubicación se grafica en la (Figura 1).

d) Temperatura superficial del mar en Zona 6.1 (TSM Zona 6.1): Localizado en la región del Golfo de Guinea en la Latitud 5°-25°S y Longitud 0°-20°W (ubicación en Figura 15, línea llena), obtenido de la NOAA/ESRL (2019). La ubicación se grafica en la (Figura 1).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con un ANAVA en el que el tratamiento ENOS se clasificó en tres (niño, niña y neutro) y el tratamiento fertilidad en dos (fertilizado y testigo). Se realizaron regresiones lineales entre los índices climáticos y el rendimiento en grano. El análisis de regresión se usó con el propósito de predicción. Todos los análisis se realizaron utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2013).

RESULTADOS

En la Tabla 1 se observa el rendimiento en grano de la variedad de trigo pan Buck Guaraní y los índices climáticos utilizados para su predicción en el período 1996 a 2017. También se presentan las precipitaciones mensuales de los meses determinantes del rendimiento del trigo.

El rendimiento en grano promedio del tratamiento fertilizado al macollaje con 100 kg.ha⁻¹ de urea fue de 2964 kg.ha⁻¹ (máximo 5873 kg.ha⁻¹ y mínimo 0 kg.ha⁻¹), mientras que el tratamiento testigo fue de 2650 kg.ha⁻¹ (máximo 5320 kg.ha⁻¹ y mínimo 0 kg.ha⁻¹).

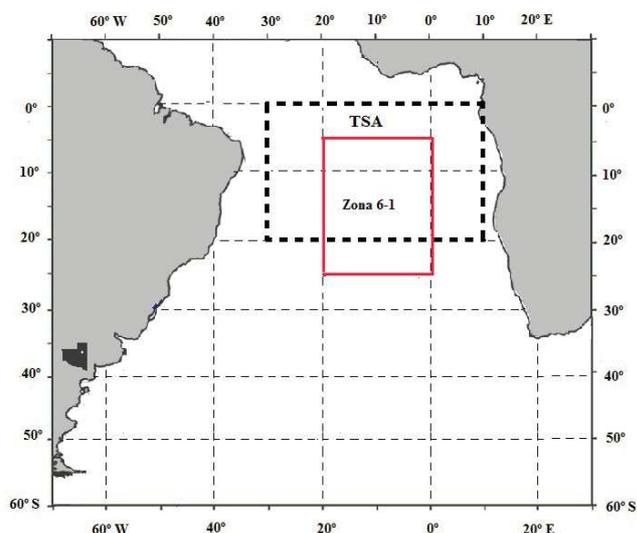


Figura 1. Ubicación de la zona de evaluación de la temperatura superficial del mar con los índices TSA y TSM zona 6.1. Línea llena TSM Zona 6.1; línea punteada TSA

Figure 1. Location of sea surface temperature assessment zone with the TSA and SST zone 6.1 indices. Line filled SST Zone 6.1; TSA dotted line

Tabla 1. Rendimiento en grano de trigo en dos tratamientos de fertilización nitrogenada; fertilizados (Fert.) y sin fertilización (Test.); precipitaciones en el período crítico e índices climáticos; ONI, MEI, TSM Zona 6.1 y TSA; desde 1996 a 2017 en Santa Rosa (LP),.
 Table 1. Grain yield of bread wheat in two nitrogen fertilization treatments; fertilized (Fert.) and non-fertilized nitrogen treatments (Test.), rains in the critical period and climatic indices; ONI, MEI, SST 6.1 Zone y TSA; from 1996 to 2017 in Santa Rosa (LP).

Año	Rendimiento (kg ha ⁻¹)		Precipitaciones (mm)*				Índice ONI**			Índice MEI**			Índice TSM Zona 6.1**	Índice TSA**	
	Fert.	Test.	Sep.	Oct.	Nov.	S	FMA	MAM	SON	Mar-Abr	Abr-May	Sep-Oct	Mar	Mar	Sep
1996	2762	2702	14,8	63,0	117,9	195,7	-0,6	-0,4	-0,4	22	27	25	20,61	0,35	0,12
1997	2584	2038	13,8	95,3	50,1	159,1	-0,1	0,3	2,3	52	60	67	20,99	-0,72	-0,05
1998	1616	1723	35,0	56,3	61,9	153,2	1,4	1,0	-1,4	67	67	15	21,13	0,45	0,19
1999	2929	2833	54,1	127,8	155,8	337,6	-1,1	-1,0	-1,3	12	12	13	20,25	0,08	0,10
2000	4033	3624	22,7	190,2	32,6	245,5	-1,1	-0,3	-0,6	21	35	22	20,73	0,13	0,02
2001	5058	3644	147,2	207,0	62,4	416,6	-0,4	-0,3	-0,3	26	36	27	20,34	0,07	-0,17
2002	3415	3681	41,0	73,0	40,4	154,4	0,1	0	1,2	44	56	57	20,28	0,03	-0,19
2003	330	302	4,8	53,6	64,7	123,1	0,4	0,2	0,3	45	34	47	20,80	0,57	0,48
2004	2610	2142	8,0	89,6	85,9	183,5	0,2	0,4	0,7	42	45	45	20,68	-0,25	0,26
2005	512	553	58,4	49,9	24,0	132,3	0,4	0,4	-0,3	55	57	28	20,92	0,47	0,01
2006	1635	1912	7,0	141,7	14,9	163,6	-0,5	-0,2	0,7	17	29	54	20,68	0,44	0,22
2007	2759	2890	108,1	57,8	66,9	232,8	0	-0,2	-1,4	31	39	10	20,93	0,12	0,15
2008	823	825	35,6	94,9	54,3	184,8	-1,2	-0,9	-0,4	13	19	16	20,93	0,62	0,21
2009	0	0	53,9	8,0	72,4	134,3	-0,5	0,4	1,0	24	38	52	20,83	0,51	0,20
2010	3914	3902	133,6	59,6	36,0	229,2	0,9	-0,6	-1,7	62	49	2	20,91	0,90	0,17
2011	2550	2462	3,8	62,3	126,1	192,2	-0,8	-0,4	-1,1	4	23	14	20,40	0,62	0,07
2012	5868	4740	18,9	192,5	82,3	293,7	-0,5	-0,4	0,2	34	53	35	19,99	-0,18	-0,21
2013	3009	2710	64,2	91,7	73,9	229,6	-0,2	-0,2	-0,2	33	33	38	20,45	0,12	-0,10
2014	4752	3228	36,5	215,9	52,7	305,1	-0,2	0,8	0,4	39	59	44	20,23	0,21	0,01
2015	4093	4098	62,7	88,4	73,6	224,7	0,6	1,0	2,4	60	62	66	20,64	0,19	-0,17
2016	5873	5320	35,3	253,2	58,1	346,6	1,7	0,3	-0,7	65	63	23	20,71	0,49	0,19
2017	4079	2982	92,9	34,9	88,3	216,1	0,1	-0,4	-0,7	58	61	19	20,32	0,25	-0,15
promedio	2964	2650	47,8	104,8	68,0	220,6	-0,06	-0,02	-0,06	37,6	43,5	32,7	20,63	0,23	0,06

Fuente: *Datos suministrados por la Cátedra Agrometeorología. ** Datos obtenidos de NOAA/ESRL <https://www.esrl.noaa.gov/>. FMA: feb-mar-abr, MAM: mar-abr-may, y SON: sep-oct-nov.

Source: * Data provided by the Agrometeorology Chair. ** Data obtained from NOAA / ESRL <https://www.esrl.noaa.gov/>. FMA: Feb-Mar-Apr, MAM: Mar-Apr-May, and SON: Sep-Oct-Nov.

La precipitación media en los meses donde se define el rendimiento fue: en septiembre 47,8 mm (máximo 147,2 mm y mínimo 3,8 mm); en octubre 104,8 mm (máximo 253,2 mm y mínimo 8,0 mm) y en noviembre 68,0 mm (máximo 155,8 mm y mínimo 14,9 mm) (Tabla 1). La distribución promedio de las precipitaciones es apropiada para el cultivo de trigo, ya que en el mes de octubre, cuando se desarrolla el periodo crítico (Fernández & Zingaretti, 2015), las mismas permiten un uso consuntivo medio de 3,5 mm.d⁻¹; aceptable para obtener un buen rendimiento en la zona de estudio (Fernández, 2007). Sin embargo la dispersión interanual de las precipitaciones hace variar abruptamente el rendimiento en grano y provoca una respuesta errática al fertilizante nitrogenado.

El ANAVA realizado sobre el rendimiento en grano con la clasificación de los 22 años analizados en niño, niña o neutro de acuerdo al índice MEI (bimestre marzo-abril) y al índice ONI (trimestre febrero-marzo-abril) con fines predictivos, no detectó diferencias significativas en ningún caso (Tabla 2). Si bien los años clasificados como Niña tuvieron rendimientos

menores, no se pudieron diferenciar estadísticamente debido a un alto coeficiente de variabilidad al igual que lo encontrado por Aramburu Merlos et al. (2015). Por su parte, Podestá et al. (1999) utilizando el JMA ENSO index (Japan Meteorological Agency), tampoco encontraron asociación con el rendimiento de trigo en la región pampeana. Aun cuando los rendimientos medios de las distintas fases ENOS no se pudieron diferenciar estadísticamente con el índice MEI de marzo-abril, en los años “neutros” se observó el mayor rendimiento. Mientras que con el índice ONI de febrero-marzo-abril el mayor rendimiento lo tuvieron los años “niños”. En los años neutros se registró la mayor respuesta al fertilizante nitrogenado con ambos índices.

No se encontró ninguna relación entre el rendimiento en grano y el índice MEI de los distintos bimestres. Heinzenknecht (2011) utilizando el índice MEI (octubre-noviembre) para el departamento capital de la provincia de La Pampa no pudo definir una relación y en el resto de los departamentos asoció El Niño con rindes normales a bajos, mientras que con La Niña encontraron rindes normales a altos.

Tabla 2. ANAVA del rendimiento en grano (kg.ha⁻¹) y la respuesta a la fertilidad con la clasificación de los años según índice MEI (Marzo-Abril) e índice ONI (Febrero-Marzo-Abril)

Table 2. ANOVA on the grain yield (kg.ha⁻¹) and fertility response with the classification of the years according to MEI Index (March-April) and ONI index (February-March-April)

Clasificación ENSO	Índice MEI (Mar-Abr)				Índice ONI (Feb-Mar-Abr)			
	n	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)			n	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)		
		Fert.	Test.	Promedio		Fert.	Test.	Promedio
Niño	8	2875	2615	2744	4	3874	3761	3817
Neutro	10	3427	2936	3181	10	2911	2417	2664
Niña	4	1984	2008	1996	8	2575	2387	2481
Promedio		2900	2650	2775		2900	2650	2775
Int. ENSO x Fertilidad		NS				NS		
DMS		1774				1754		
Significancia (P≤0,05)		NS				NS		
C.V. (%)		55,49				54,86		

Referencias: Diferencia de medias fue testeada con LSD (P≤0,05). n = número de años. NS= no significativo. DMS = diferencia mínima significativa. Fert.= fertilizado; Test.= Testigo. C.V.(%)= coeficiente de variación de la media.

References: Difference of means was tested with LSD (P≤0.05). n = number of years. NS = not significant. DMS = significant minimum difference. Fert. = Fertilized; Test. = Witness. C.V. (%) = variation coefficient

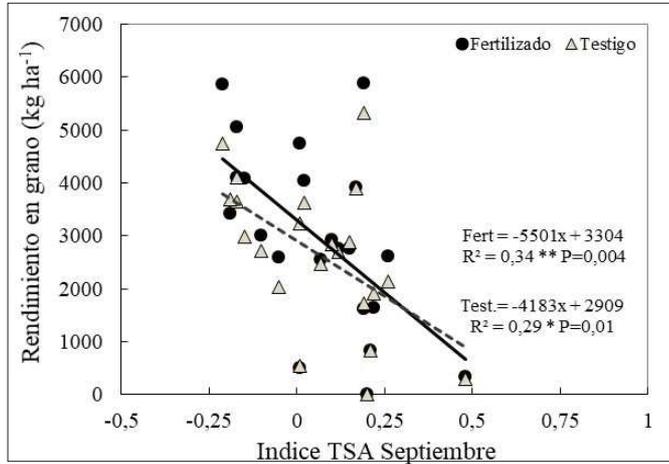


Figura 2. Relación entre el rendimiento en grano de trigo y el índice TSA (Sep)
 Figure 2. Relationship between wheat grain yield and the TSA index (Sep)

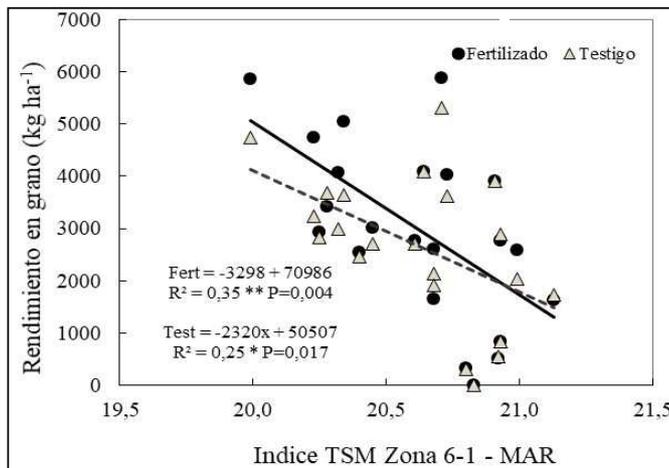


Figura 3. Relación entre el rendimiento en grano de trigo y el índice TSM Zona 6.1 (Mar)
 Figure 3. Relationship between wheat grain yield and the TSM Zone 6.1 index (Mar)

Nnamchi et al. (2011) propusieron que el fenómeno denominado “Dipolo del Atlántico Sur” es capaz de influenciar la variabilidad de la precipitación interanual en Sudamérica. El índice Dipolo del Atlántico Sur, mostró sobre las cuencas de los ríos Limay, Neuquén, Colorado y Negro que en los años húmedos adquiere valores

negativos durante todos los meses y durante los años secos valores positivos (Romero et al. 2016). Bombardi et al. (2014) propusieron una asociación entre anomalías negativas en el Dipolo del Atlántico Sur y un aumento de las precipitaciones en Sudamérica durante los años neutros del ENOS.

El índice TSA de marzo (Figura 1) no tuvo una relación significativa con el rendimiento en grano. El índice TSA del mes de septiembre tuvo una relación significativa inversa (Figura 2; r Pearson = -0,583; fertilizado y r Pearson = -0,539 testigo), pero este mes ya es tarde para la decisión de siembra y la de fertilización.

Sin embargo, focalizando el índice TSM zona 6.1 del Océano Atlántico del mes de marzo, (ubicación en Figura 1, línea llena) se encontró una asociación relación inversa altamente significativa con el rendimiento en grano (r Pearson = -0,500; fertilizado y r Pearson = -0,592 testigo) (Figura 3). El TSA y TSM Zona 6.1 coinciden aproximadamente con el polo del nordeste del Atlántico Sur (northeast pole; NEP) definido por Nnamchi et al. (2011) ubicado en 10°E - 20°W, 0°S - 15°S.

Las lluvias de octubre y del trimestre septiembre - octubre - noviembre explicaron en buena proporción el rendimiento en grano. En el caso de la lluvia del mes de octubre el R^2 fue de

0,501 ($P < 0,01$) (r Pearson = 0,708 y 0,628 fertilizado y testigo respectivamente, Figura 4). La del trimestre septiembre - octubre - noviembre mostró dos comportamientos con el rendimiento en grano, uno lineal positivo hasta los 250 mm de precipitaciones ($R^2 = 0,64$, $P < 0,01$ fertilizado) (r Pearson = 0,800 y 0,775 para fertilizado y testigo respectivamente), y otro a partir de los 300 mm donde no se observó una relación entre el rendimiento en grano y las precipitaciones. Además, hasta los 250 mm de precipitación en este trimestre, no hubo diferencias al agregar fertilizante nitrogenado al macollaje; mientras que a partir de los 300 mm hubo una brecha de aproximadamente 1000 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ a favor de agregar fertilizante nitrogenado al macollaje (Figura 5).

En cualquier cultivo es importante la predicción de la respuesta al agregado de fertilizante nitrogenado, ya que abarata costos y reduce la contaminación. En Australia, Asseng et al. (2012) encontraron beneficios al utilizar los pronósticos del clima por un aumento en los márgenes económicos y en la racionalización de la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo. En este trabajo se observó una baja relación (sólo significativa a $P = 0,10$) entre el índice MEI del bimestre abril-mayo y la respuesta del rendimiento en grano a la

fertilización nitrogenada. No obstante, se encontró una relación inversa significativa entre la respuesta al agregado de fertilizante nitrogenado en macollaje y el índice TSM Zona 6.1 del Océano Atlántico en el mes de marzo (r Pearson = -0,49; Figura 6). En este sentido, se observa además una relación altamente

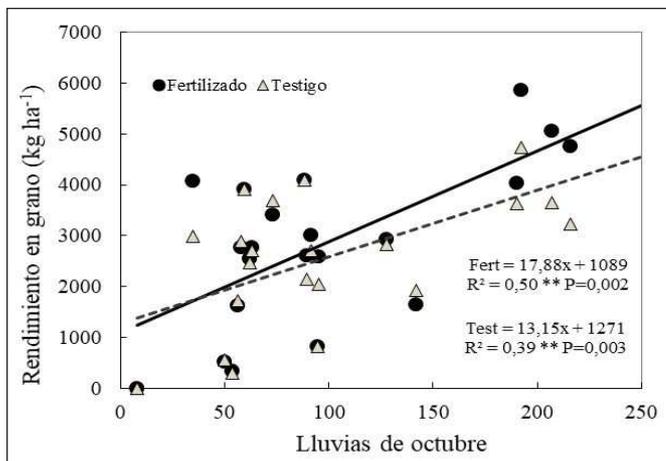


Figura 4. Relación entre el rendimiento en grano de trigo y las lluvias mensuales de octubre.

Figure 4. Relationship between wheat grain yield and the monthly October rains.

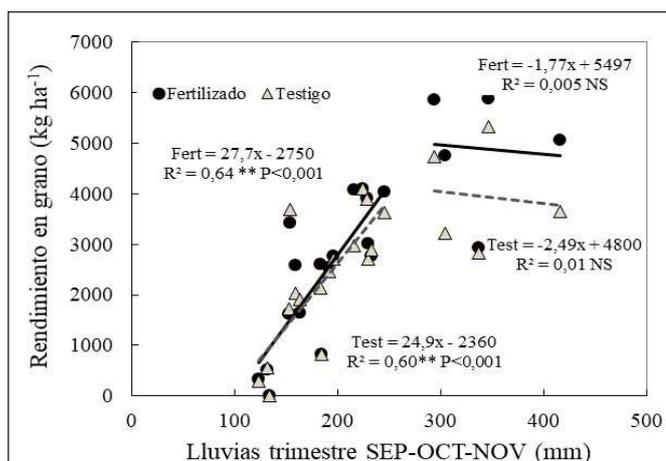


Figura 5. Relación entre el rendimiento en grano de trigo y las lluvias trimestrales de septiembre-octubre-noviembre

Figure 5. Relationship between wheat grain yield and the quarterly rains from September-October-November

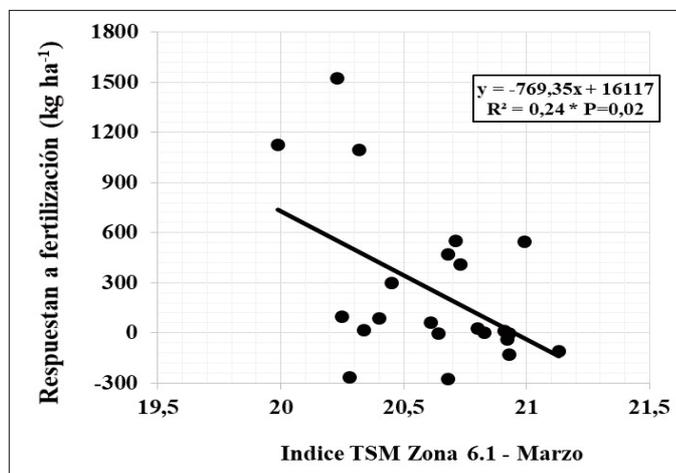


Figura 6. Relación entre la respuesta al fertilizante nitrogenado y el índice TSM Zona 6.1 (Mar).

Figure 6. Relationship between the response to nitrogen fertilizer and the TSM Zone 6.1 index (Mar).

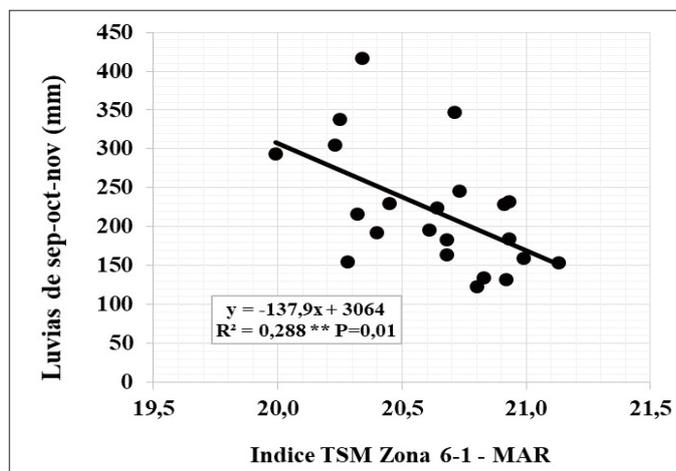


Figura 7. Relación entre las lluvias trimestrales de septiembre-octubre-noviembre y el índice TSM Zona 6.1 (Mar)

Figure 7. Relationship between the quarterly rains of September-October-November and the TSM Zone 6.1 index (Mar)

significativa entre el índice TSM Zona 6.1 en el mes de marzo y las lluvias del trimestre septiembre-octubre-noviembre (Figura 7; $R^2 = 0,29$; $P=0,01$; r Pearson = $-0,537$). También se encontró una relación significativa entre el índice TSA de marzo y la respuesta al agregado

de fertilizante nitrogenado en macollaje (Figura 8; $R^2 = 0,20$; $P=0,04$; r Pearson = $-0,447$).

CONCLUSIÓN

En este estudio se detectó una relación entre el índice TSM Zona 6.1 del Océano Atlántico en el mes de marzo y el rendimiento en grano de trigo sembrado en el invierno subsiguiente en la región sub-húmeda seca pampeana. A medida que el índice aumentó, el rendimiento en grano y la respuesta al agregado de fertilizante disminuyó. Esto podría incorporarse en los modelos de decisión previos al inicio de la campaña de trigo para estimar los rendimientos alcanzables y mejorar además los modelos de respuesta a la fertilización nitrogenada en la región. El índice TSA de marzo no mostró un buen ajuste con el rendimiento en grano, pero si en la respuesta a la fertilización nitrogenada. Además, no hubo una clara relación entre los índices del fenómeno ENOS, MEI y ONI, con el rendimiento de trigo en la región subhúmeda seca pampeana.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la ayuda proporcionada por el Dr. Mariano Méndez y el Ing. Agr. Sergio Bongianino, integrantes de la asignatura Agrometeorología, quienes me ayudaron en la búsqueda de índices e información climática.

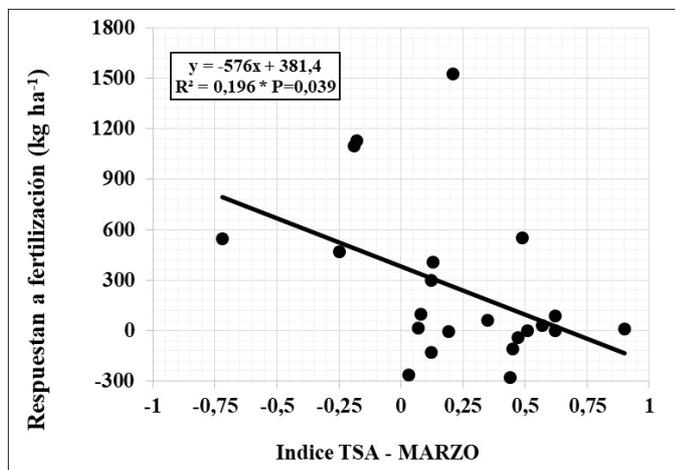


Figura 8. Relación entre la respuesta al fertilizante nitrogenado y el índice TSA (Mar).

Figure 8. Relationship between the response to nitrogen fertilizer and the TSA index (Mar)

BIBLIOGRAFÍA

- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., & Piccolo, M. C. (2017). Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*, 37, 1237-1247.
- Anderson, W., Seager, R., Baethgen, W., & Cane, M. (2016). Life cycles of agriculturally relevant ENSO teleconnections in North and South America. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.4916.
- Andreoli, R. V., & Kayano, M. T. (2004). Multi-scale variability of the sea surface temperature in the Tropical Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 109, C05009, doi:10.1029/2003JC002220.
- Andreoli, R. V., & Kayano, M. T. (2006). Tropical Pacific and tropical South Atlantic effect on rainfall variability over Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 26, 1895-1912.
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J. P., Mercau, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J., Jobbagy, E., Cassman, K. G., & Grassini, P. (2015). Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184, 145-154.
- Asseng, S., McIntosh, P. C., Wang, G., & Khimashia, N. (2012). Optimal N fertiliser management based on a seasonal forecast. *European Journal of Agronomy*, 38, 66-73.
- Barros, V. R., Castañeda, M. E., & Doyle, M. E. (2000). Recent precipitation trends in Southern South America East of the Andes: an indication of climatic variability. En P.P. Smolka, V. Volkheimer (Eds.), *Southern Hemisphere Paleo & Neoclimates: Key Sites, Methods, Data and Models* (pp. 187-206). Berlin: Springer-Verlag.
- Bombardi, R. J., Carvalho, L. M. V., Jones, C., & Reboita, M. S. (2014). Precipitation over eastern South America and the South Atlantic Sea surface temperature during neutral ENSO periods. *Climate Dynamics*, 42, 1553-1568.
- Dhillon, S. S., & Ortiz-Monasterio, J. I. (1993). Effects of date of Sowing on the yield and yield components of spring wheat and their relationship with solar radiation and temperature at Ludhiana, Punjab, India. Wheat special Report 23b.
- Díaz, R. A., & Mormeneo, I. (2002). Zonificación del clima de la Región Pampeana mediante análisis de conglomerados con consenso. *Revista Argentina de Agrometeorología*, 2, 125-131.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2013). InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Enfield, D. B., Mestas, A. M., Mayer, D. A., & Cid-Serrano, L. (1999). How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7841-7848.
- Fernández, M. A. (2007). Estrategias para mejorar el rendimiento de cereales graníferos invernales en la Región Semiárida Pampeana Central. (Tesis MSc. UNS), Bahía Blanca, Argentina.
- Fernández, M. A. (2013). Estrés hídrico: sus efectos sobre el rendimiento de grano y la eficiencia de uso del agua de trigo pan (*Triticum aestivum* L.), trigo fideo (*Triticum durum* Desf.) y Triticale (X *Triticosecale*, Wittmack). *Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam*, 23, 7-23.
- Fernández, M. A., & Zingaretti, O. (2015). El uso consuntivo en el período crítico para la predicción del rendimiento en grano de trigo pan, trigo candeal y triticale en la región semiárida pampeana. *Semiárida. Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam*, 25, 29-39.
- Fischer, R. A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *The Journal of Agricultural Science*, 105, 447-461.
- Flantua, S. G. A., Hooghiemstra, H., Vuille, M., Behling, H., Carson, J. F., Gosling, W. D., Hoyos, I., Ledru, M. P., Montoya, E., Mayle, F., Maldonado, A., Rull, V., Tonello, M. S., Whitney, B. S., & González-Arango, C. (2016). Climate variability and human impact in South America during the last 2000 years: synthesis and perspectives from pollen records. *Climate of the*

Fernandez, M. A.

Past, 12, 483-523.

- Grimm, A. M. (2011). Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 25, 537-554.
- Heinzenknecht, G. (2011). Impacto de "El Niño" y "La Niña" sobre los rendimientos de los principales cultivos de las provincias de la Región Pampeana. Oficina de Riesgo Agropecuario.
- Izumitani, T., Luo, J., Challinor, A. J., Sakurai, G., Yokozawa, M., Sakuma, H., Brown, M. E., & Yamagata, T. (2014). Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/ncomms4712.
- Kayano, M. T., de Oliveira, C. P., & Andreoli, R. V. (2009). Interannual relations between South American rainfall and tropical sea surface temperature anomalies before and after 1976. *International Journal of Climatology*, 29, 1439-1448.
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Müller, G. V., Sgroi, L. C., & Baethgen, W. E. (2018). Interannual-to-multidecadal hydroclimate variability and its sectoral impacts in northeastern Argentina. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 3155-3174.
- MAGyP. (2019). Estimaciones agrícolas. <http://datosestimaciones.magyp.gov.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>.
- Nnamchi, H. C., Li, J., & Anyadike, R. N. C. (2011). Does a dipole mode really exist in the South Atlantic Ocean?. *Journal of Geophysical Research*, 116, D15104.
- Nnamchi, H. C., Kucharski, F., Keenlyside, N. S., & Farnet, R. (2017). Analogous seasonal evolution of the South Atlantic SST dipole indices. *Atmospheric Science Letters*, 18, 396-402.
- NOAA/ESRL. (2019). National Oceanic and Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory. U.S. Department of Commerce. <https://www.esrl.noaa.gov/>. visitada diciembre 2018.
- Pascale, A. J., & Damario, E. A. (2004). Clasificación por tipos agroclimáticos del cultivo de trigo. En A. J. Pascale & E. A. Damario (Eds.), *Bioclimatología agrícola y agroclimatología* (pp. 418-436). Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina.
- Penalba, O. C., & Rivera, J. A. (2016). Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America – emphasis in regional drought occurrences. *Advances in Geosciences*, 42, 1-14.
- Pérez, S., Sierra, E., Momo, F., & Massobrio, M. (2015). Changes in average annual precipitation in Argentina's Pampa Region and their possible causes. *Climate*, 3, 150-167.
- Podestá, G., Messina, C., Grondona, M., & Magrin, G. (1999). Associations between grain crop yields in Central-Eastern Argentina and El Niño–Southern Oscillation. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 1488-1498.
- Podestá, G., Letson, D., Messina, C., Royce, F., Ferreyra, R. A., Jones, J., Hansen, J., Llovet, I., Grondona, M., & O'Brien, J. J. (2002). Use of ENSO-related climate information in agricultural decision making in Argentina: a pilot experience. *Agricultural Systems*, 74, 371-392.
- Pol, M., & Binyamin, J. (2014). Impact of climate change and variability on wheat and corn production in Buenos Aires, Argentina. *American Journal of Climate Change*, 3, 145-152.
- Ramirez-Rodriguez, M. A., Asseng, S., Fraisse, C., Stefanova, L., & Eisenkolbi, A. (2014). Tailoring wheat management to ENSO phases for increased wheat production in Paraguay. *Climate Risk Management*, 3, 24-38.
- Romero, P. E., Garbarini, E. M., & González, M. H. (2016). Patrones de temperatura de mar y circulación atmosférica asociados a eventos húmedos y secos en el Comahue. 3° Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. https://www.ina.gov.ar/ifrh-2016/trabajos/IFRH_2016_paper_9.pdf. 14p.
- Seager, R., Naik, N., Baethgen, W., Robertson, A., Kushnir, Y., Nakamura, J., & Jurburg, S. (2010). Tropical oceanic causes of interannual to multidecadal precipitation variability in Southeast South America over the past century. *Journal of Climate*, 23, 5519-5539.
- Soil Survey Staff. 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos. Cap. 12: Molisoles. Dpto. Agric. de USA-Serv. Conservación Rec. Nat. (12nd ed.), USDA,
- Travasso, M.I., G.O. Magrin & G.R. Rodríguez. 2003. Relations between sea surface temperature and crop yields in Argentina. *International Journal of Climatology*, 23, 1655-1662.
- Tripaldi, A., Zárate, M. A., Forman, S. L., Badger, T., Doyle M.E., & Ciccio, P. (2013). Geological evidence for a drought episode in the western Pampas (Argentina, South America) during the early-mid 20th century. *The Holocene*, 23, 1731-1746.
- Viglizzo, E.F., Ricard, F. M., Jobbágy, E. G., Frank, F. C., & Carreño, L. V. (2011). Assessing the cross-scale impact of 50 years of agricultural transformation in Argentina. *Field Crops Research*, 124, 186-194.
- Wolter, K., & Timlin, M. S. (1998). Measuring the strength of ENSO - how does 1997/98 rank?. *Weather*, 53, 315-324.
- Yu, J., & Kim, S. T. (2013). Identifying the types of major El Niño events since 1870. *International Journal of Climatology*, 33, 2105-2112.
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415-421.